



Pro gradu -tutkielma
Fysiikan opettajan suuntautumisvaihtoehto

Ihmisäänen ja vokaalien tutkiminen koulufysiikassa

Jakke Setälä

3.5.2020

Ohjaaja: Yliopistonlehtori Ari Hämäläinen

Tarkastajat: Yliopistonlehtori Ari Hämäläinen

Professori Ismo Koponen

HELSINGIN YLIOPISTO

FYSIIKAN OSASTO

PL 64 (Gustaf Hällströmin katu 2)
00014 Helsingin yliopisto

Tiedekunta - Fakultet - Faculty Matemaattis-luonnontieteellinen		Laitos - Institution - Department Fysiikan laitos	
Tekijä - Författare - Author Jakke Setälä			
Työn nimi - Arbetets titel Ihmisäänen ja vokaalien tutkiminen koulufysiikassa			
Title Ihmisäänen ja vokaalien tutkiminen koulufysiikassa			
Oppiaine - Läroämne - Subject Fysiikka			
Työn laji/ Ohjaaja - Arbetets art/Handledare - Level/Instructor Pro gradu -tutkielma / Ari Hämäläinen		Aika - Datum - Month and year 3.5.2020	Sivumäärä - Sidoantal - Number of pages 80
<p>Tiivistelmä - Referat - Abstract</p> <p>Tämän työn tavoitteena on tutkia ihmisen laulamalla tuottamien vokaalien ominaisuuksia kouluissa saatavilla olevalla laitteistolla. Tarkoitus on havaita vokaalien erot niiden spektrejä tulkitsemalla ja mahdollistaa tämän tiedon sisällyttämistä koulujen fysiikan opetukseen.</p> <p>Työtä varten kerätään ääninäytteitä viidestä eri vokaalista molempia sukupuolia edustavilta vapaaehtoisilta kokeilailta. Osa heistä on laulunopettajia, joilla on laaja kokemus ja osaaminen äänenkäytöstä. Osa on laulunopiskelijoita ja loput ovat maallikkoja, joilla on hyvin vähän tai ei ollenkaan kokemusta laulamisesta ja nk. oikeaoppisesta äänenkäytöstä.</p> <p>Tuloksista nähtiin, että laulettujen vokaalien erot ovat nähtävissä helpoiten M1 ja M2 (twang) mekanismeilla tuotetussa äänessä. Kuiskaamalla lausutut vokaalit erotettiin myös hyvin toisistaan. Havaittiin, että työ on toteutettavissa kouluissa välineistöstä riippumatta mobiililaitteiden tuomien mahdollisuuksien takia.</p>			
Avainsanat – Nyckelord – Keywords Ääni, Äänenväri, Formantti, Laulu			
Säilytyspaikka - Förvaringsställe - Where deposited			
Muita tietoja - Övriga uppgifter - Additional information			

Sisällysluettelo

Sisällysluettelo	2
1 Johdanto	1
1.1 Tutkimuskysymykset	2
2. Ääni	4
2.1 Ääni ilmiönä	4
2.2 Äänenväriin fysiikkaa	4
2.2.1 Äänenväriin määritelmä	4
2.2.2 Yläsävelsarja	5
2.2.3 Äänen dynaamiset ominaisuudet	6
2.2.4 Äänien Fourier-analyysi	7
2.3 Ihmisen äänentuottoelimistö	10
2.4 Äänen syntyminen	14
2.4.1 Formanteista	15
2.4.2 Vokaaleista ja niiden muodostuksesta	16
2.4.3 Laulajan formantti	19
2.5 Lauluäänen rekisterit	19
2.5.1 Ihmisen lauluäänen termistöä	22
2.6 Äänen synnyn teorit	23
2.6.1 Yhteenvetoa	25
3. Äänen opettaminen	27
3.1 Oppiminen tutkimuskohteena	27
3.1.1 Konstruktivistisen oppimisen malli	27
3.1.2 Konstruktivistinen oppiminen korostaa oppilaan omaa aktiivisuutta	27
3.1.3 Fysiikan opettamisen problematiikkaa	28
3.1.8 Motivaation kasvattaminen kokemuseräisen äänikurssin avulla	32
3.1.4 Oppiaineintegrointi	33
3.2 Toteutetun tutkimuksen tavoitteet ja tarkennetut tutkimuskysymykset	33
4. Laulajien äänen tutkiminen	34
4.1 Koejärjestely	34
4.2 Mittalaitteisto	35
4.3 Koehenkilöt	36
5. Tulokset	37
5.1 Spektrien tulkinta	37
N3 M1 spektrit:	38
MS3 M1 spektrit:	40
5.2 Spectroid	43
5.3 Formanttien taajuudet eri koehenkilöillä	44

5.3 Formanttien suhteelliset amplitudit eri vokaaleille	48
5.4 Huomioita kokeista	62
6. Johtopäätökset	64
7. Opetuskokeilu ja projektityö.....	65
8. Viitteet	67

1 Johdanto

Tämän tutkielman aiheena on lauluäänen väri, sen muodostuminen ja siihen vaikuttavat tekijät, aiheeseen liittyvät fysiikan ilmiöt, vokaalien formantit, sekä näiden seikkojen opettamisen kehittäminen. Lopuksi ehdotetaan tapaa opettaa asia lukioikäisille oppilaille. Äänenväriin ja ääneen olin perehtynyt jo kandidaatin tutkielmassani (Setälä, J., 2018), joten tämä tutkielma on luonnollinen jatkumo siihen.

Työn tarkoitus on saada mitattua kouluista löytyvillä laitteilla ihmisen laulamien vokaalien eroja. Mittaamalla luodut äänen spektrikuvaajat sisältävät paljon hyödyllistä informaatiota äänestä ja sen oppiminen on mielestäni yhtä perusteltua, kuin muidenkin kouluissa opettavien fysiikan aihealueiden. Kuitenkin on niin, että ihminen voi käydä koko lukion oppimäärän kohtaamatta näitä asioita missään vaiheessa. Haluan tutkielmani avulla tuoda äänen kiinnostavia ominaisuuksia paremmin muidenkin tietouteen kertomalla niistä tässä selkeästi ilman matematiikkaa.

Työn yksi tarkoitus on luoda lukion opettajille mahdollisuus tuoda äänen ominaisuuksien tutkimista luokahuoneeseen. Koska työ on vahvasti sidoksissa koulumaailmaan, on syytä lukea, mitä opetussuunnitelmaan on kirjattu äänen opetuksesta fysiikassa:

Lukion opetussuunnitelmassa asetetaan opetuksen tavoitteet ja määritellään asiat, jotka kouluissa pitäisi käydä läpi. LOPS 2015 mukaan:

”Fysiikan opetus tukee opiskelijoiden luonnontieteellisen ajattelun sekä maailmankuvan kehittymistä osana monipuolista yleissivistystä. Opetus ohjaa opiskelijaa ymmärtämään fysiikan merkitystä jokapäiväisessä elämässä, ympäristössä, yhteiskunnassa ja teknologiassa.”

Ja että:

”Opiskelijoiden oma kokeellinen työskentely kehittää työskentelyn ja yhteistyön taitoja, luovaa ja kriittistä ajattelua sekä innostaa opiskelijoita fysiikan opiskeluun.”

Erikseen FY05 kurssista (jaksollinen liike ja aallot) mainitaan tavoitteina ja keskeisinä sisältöinä:

- Opiskelija perehtyy värähdys- ja aaltoliikkeen perusteisiin tutkimalla mekaanista värähtelyä ja ääntä
- Opiskelija osaa käyttää tieto- ja viestintäteknologiaa mallintamisen välineenä
- Fysiikan merkitys lääketieteessä ja musiikissa
- Ääni aaltoliikeilmiönä

Jos tarkastellaan vuoden 2019 LOPS luonnosta, huomataan että siinä korostetaan samoja seikkoja ja tämän lisäksi mainitaan erikseen projektioppiminen:

”Opiskelijoiden oma tutkimuksellinen työskentely kehittää työskentelyn ja yhteistyön taitoja, luovaa ja kriittistä ajattelua sekä innostaa opiskelijoita fysiikan opiskeluun. Projektioppimisen kautta ja ryhmässä työskennellen opiskelija kehittää vuorovaikutusosaamistaan ja oppii vuorovaikutustaitoja, pitkäjänteisyyttä ja vastuunottamista omasta työskentelystään.”

”FY04 moduulin keskeisiä sisältöjä voidaan tarkastella esimerkiksi seuraavissa temaattisissa yhteyksissä: heiluri, erilaiset soittimet, akustiikka ja äänentoisto, melun haittavaikutukset ja kuulon suojaaminen sekä ultraäänikuvaus. Keskeisiä sisältöjä voidaan tarkastella esimerkiksi seuraavilla kokeilla: heilurin heilahdusajan kokeellinen määrittäminen heilurin pituuden funktiona, äänen nopeuden määrittäminen ja äänen taajuusanalyysi.” (LOPS 2021 luonnos, (2019))

Näiden perusteella tämä tutkielma on myös aiheeltaan sopiva ja ajallisesti relevantti.

Tässä työssä tutkitaan, ovatko vokaalien erot nähtävissä riittävän selkeästi saatavilla olevilla välineillä. Kiinnostavaa on myös selvittää, vaikuttaako laulutapa tai laulajan kokemus siihen, miten hyvin spektreistä nähdään vokaalien erot.

Tutkielman rakenne on seuraava:

Luvussa 2 käydään läpi perusteita äänestä fysikaalisena ilmiönä sekä yleisiä seikkoja äänenväristä. Tämän jälkeen käydään läpi aiheeseen liittyvää ihmisen fysiologiaa mm. äänielimien osalta ja tarkastellaan ihmisäänen ominaisuuksia ja terminologiaa. Tämän osion lopuksi tarkastellaan toisistaan poikkeavia käsityksiä äänen synnystä ihmisen elimistössä.

Luvussa 3 tutustutaan aiheen opettamiseen liittyvään pedagogiaan, opetusteorioihin sekä tutkimustuloksiin.

Luku 4 sisältää kuvauksen kokeesta ja koejärjestelyistä, joiden avulla selvitetään lauluäänen spektrin koostumusta.

Luvussa 5 esitellään kokeen päätulokset. Tulosten tarkastelun yhteydessä pohditaan koejärjestelyn soveltumista osaksi lukio-opetusta.

Lopuksi luvussa 6 esitellään kaiken aikaisemman avulla muodostettu opetustuokio/projektityö, joka toimii esimerkkinä siitä, miten tällaisen aiheen saa helposti istutettua lukion opetussuunnitelmaan ja koulujen lukujärjestykseen.

1.1 Tutkimuskysymykset

Tässä tutkielmassa etsitään vastausta seuraaviin kysymyksiin:

Voidaanko lauluäänen spektriä tutkia helposti luokkatiloissa ja saada toistettavia tuloksia lukiotason tiedoilla?

Nähdäänkö erot kaikkien vokaalien formanttien välillä spektreistä käytettävissä olevilla välineillä?

Huomataanko eroja eritasoisten laulajien äänten spektreissä?

Löytyykö äänistä tai tutkimuksen aikana muuta kiinnostavaa?

Tutkimushypoteesina on, että koejärjestelyn avulla saadaan mitattua eroja äänien värissä. Käytetty koejärjestely koetaan oppilasta motivoivana, mikä puolestaan avaa uuden näkökulman äänen opettamiseen motivoivasti fysiikan tunneilla.

2. Ääni

2.1 Ääni ilmiönä

Ihmisen aistit ovat elintärkeitä jokapäiväisessä elämässä. Jopa yhden aistin menettäminen voi vaikuttaa suuresti elämänlaatuun. Monelle ihmiselle näköaisti on tärkein aisti päivittäisiä askareita silmällä pitäen. Toiseksi pääsee kuuloaisti, sillä niin monet asiat ihmisten elämässä ja kanssakäymisessä perustuvat mahdollisuudelle ymmärtää puhuttua viestintää. Kuuloaistia hyödynnetään myös vihteessä, kuten musiikissa ja elokuvissa. Ääni on perustavanlaatuinen osa ihmisen arkea ja ihmisen kyky tuottaa ääntä monipuolisesti on erottamaton osa ihmisten välistä kanssakäymistä.

Ääni itsessään on havainto, jonka korva rekisteröi, kun sen kuuloelimet reagoivat väliaineessa etenevien aaltojen värähtelyyn. Äänen syntyyn liittyy aina jonkinlainen värähtelijä, joka saa aaltoliikkeen aikaan väliaineessa, kuten ilmassa tai vedessä, saaden näin väliaineen värähtelemään joko pitkittäisenä tai poikittaisena aaltoliikkeenä (Hämäläinen, A., (2015)). Kiinteissä aineissa ääni voi kulkea sekä pitkittäisenä, että poikittaisena aaltoliikkeenä, mutta ei-kiinteiden aineiden, kuten kaasujen tai nesteen läpi kulkiessaan ääni voi liikkua ainoastaan pitkittäisenä aaltoliikkeenä. Poikittaisen aaltoliikkeen mahdollistaa siis vain kiinteä väliaine. Kiinteä väliaine pystyy välittämään poikittaissuunnassa tapahtuvan liikkeen eteenpäin vahvojen sidostensa ansiosta, koska silloin aineen rakenneosaset eivät pääse liukumaan toistensa ohitse. Pitkittäiset ääniaallot ilmenevät väliaineen osien puristumina ja harventumina. Poikittaisten aaltojen tapauksessa väliaineen poikkeama on kohtisuorassa aallon kulkusuuntaa vasten.

Ihminen aistii äänen, kun korvan tärykalvo rekisteröi äänen väliaineessa aiheuttamat paineenmuutokset. Nämä paineenmuutokset välittyvät aivoihin signaalina, jonka aivot käsittelevät ja lopulta tulkitsevat äänenä. Äänet voidaan karkeasti jakaa kahteen eri luokkaan: ääniin, joilla on jokin havaittava sävelkorkeus, kuten pianon koskettimen painallus, tai ääniin, jotka kuullaan meluna tai muuna epämääräisenä aistimuksena, kuten liikenteen melu. Äänen musikaalisen luonteen määrittävät äänessä olevat osäänekset, jotka voivat olla joko harmonisia tai epäharmonisia. Näiden osäänenesten suhteellinen määrä ja intensiteetti havaitussa äänessä saavat äänen kuulostamaan esimerkiksi musiikilta, kolinalta tai melulta.

2.2 Äänenväriin fysiikkaa

2.2.1 Äänenväriin määritelmä

Äänen ominaisuuksia kuvailtaessa käytetään muun muassa termejä sävelkorkeus, äänenvoimakkuus ja äänenväri. Sävelkorkeudella tarkoitetaan sitä, kuinka korkealta tai matalalta ääni vaikuttaa kuulijasta. Äänenvoimakkuus taas kuvaa subjektiivista kokemusta, kuinka voimakkaana ääni aistitaan. Äänenvoimakkuuden mittayksikkönä käytetään soonia. Yleinen äänen mittayksikkö desibeli (dB) taas liittyy objektiiviseen

äänenpaineen mittaamiseen. Äänenväri sen sijaan kuvaa äänen niitä ominaisuuksia, joiden perusteella henkilö voi erottaa kaksi ääntä toisistaan minkä tahansa muun kriteerin, kuin sävelkorkeuden, keston tai äänenvoimakkuuden perusteella (Pratt, R., L., & Doak, P., E., (1976), 317). Äänenväriin vaikuttavat pääasiassa osäänenesten suhteelliset voimakkuudet äänessä, sekä äänen dynaamiset ominaisuudet, kuten aluke ja lopuke, verhoikäyrä ja vibrato. Ihminen tunnistaa keskimäärin soitetun äänen äänenvärin noin 60 ms:ssa. Jokainen kestoaltaan alle 4 ms oleva ääni havaitaan atonaalisena klikkinä (Winckell, Fritz, (1967), 111).

2.2.2 Yläsävelsarja

Jokainen havaittu ääni koostuu osääneksistä, jotka antavat äänelle sen karakteristisen soinnin. Äänen väriin ja luonteeseen voi tutustua tarkastelemalla äänen yläsävelsarjaa. Harmoninen yläsävelsarja on äänten sarja, jossa jokaisen osääneksen taajuus on alimman osääneksen, perustaajuuden, kokonaislukukerrannainen. Yksittäinen osäänes on havaittua ääntä kuvaavan summa-aallon pienin osa, eli yksinkertainen siniaalto. Harmonisen yläsävelsarjan osia kutsutaan yläsäveliksi. Myös perustaajuus, katsotaan kuuluvaksi yläsävelsarjaan. Osääneksiä on äänestä riippuen sekä harmonisia, että epäharmonisia. Harmonisella osääneksellä tarkoitetaan osäänestä, joka on jokin äänen yläsävelistä, kun taas epäharmoninen osäänes on osäänes, joka ei ole perustaajuuden kokonaislukukerrannainen, eikä täten myöskään siis yläsävel (Rossing, T., D. 1990, 56, 139). Epäharmonisuutta lähimmästä yläsävelestä ilmaistaan käyttämällä yksikköä sentti, joka on äänenkorkeuksien eron yksikkö. Sen suuruus on 1/100 puolissävelaskelta.

Harmonisen yläsävelsarjan muodostumisessa voidaan käyttää esimerkkinä kitaralla soitettua säveltä. Kun soitetaan vaikkapa kitaran A-kieltä standardivireessä, aiheutuu värähtelyä, jonka perustaajuus on 110 Hz. Koska kieli aiheuttaa kuuloaistimuksen, jonka voimme tunnistaa A2-säveleksi, on kielten aiheuttamien värähtelyjen oltava kokonaislukukerrannaisia tämän sävelen taajuudesta 110 Hz. Kitaran kielen eri ominaisvärähtelyn muodot luovat osääneksiä, jotka muodostavat harmonisen yläsävelsarjan. Samanlainen ilmiö esiintyy myös ilmapatsaan värähdellessä esimerkiksi puhallinsoittimen sisällä tai laulettaessa ihmisen sisällä.

Jotkut soittimet, kuten rummut ja symbaalit eivät kuitenkaan muodosta soidessaan harmonista yläsävelsarjaa. Näiden soitinten ääni ei koostu perustaajuuden kokonaislukumonikerroista. Tämä tarkoittaa sitä, että kun vaikkapa rummun kalvo asetetaan värähtelemään, ei ensimmäisen yläsävelen jälkeen tule välttämättä toista yläsäveltä, vaan esimerkiksi jokin osäänes, joka ei ole ensimmäisen yläsävelen kokonaislukukerrannainen.

Rumpu, jonka ääni sisältää paljon inharmonisuutta ei muodosta selkeästi havaittavaa sävelkorkeutta. Tällaisilla äänillä voi kuitenkin olla äänenvärinsä puolesta ominaisuuksia, jotka kuulijalle ilmenevät vaikkapa korkeana tai matalana. Tällaisia

äänenväriin ominaisuuksia voisi olla esimerkiksi metallisuus ja kilahtavat äänet. (Schneider, A., Frieler, K., (2008), 8)

Äänenväriin vaikuttaa hyvin paljon kuullun äänen eri osäänesten suhteellinen intensiteetti. Ääni, jonka korkeataajuisien osäänesten intensiteetti on suuri, kuulostaa kirkkaalta tai kimeältä. Jos taas matalammilla taajuuksilla esiintyvien osäänesten intensiteetti on suuri, kuulostaa ääni tummalta ja mutaiselta tai puuroiselta. Äänen eri osäänesten intensiteettiä voi muuttaa taajuuskorjaimen avulla. Esimerkiksi monissa stereoissa on mahdollista säätää kuunnellun äänen taajuusalueita erillisten "low", "middle" ja "high" -säädinten avulla. Niillä voi nimiansä mukaan korostaa tai leikata äänen sisältämien taajuuksien osaa kuullussa äänessä matalalla, keski- tai korkeilla taajuuksilla. Joskus läsnä on näiden säädinten sijaan vain yksittäinen "tone" -säädin, joka ajaa saman asian hieman yksinkertaisemmin (Pierce, J., R., (1992), 36-37). Ammattilaiskäytössä olevissa miksauslaitteissa on taajuuskorjaimena graafinen tai parametrinen taajuuskorjain. Graafisessa taajuuskorjaimessa on monia liukusäätimiä, joista jokainen hallitsee tiettyä taajuuskaistan osaa. Parametrisella taajuuskorjaimella voidaan säätää valitun taajuuden keskitaajuutta ja kaistanleveyttä muokattavalle taajuusalueelle. Näillä voidaan joko korostaa tai vähentää haluttua taajuutta äänessä.

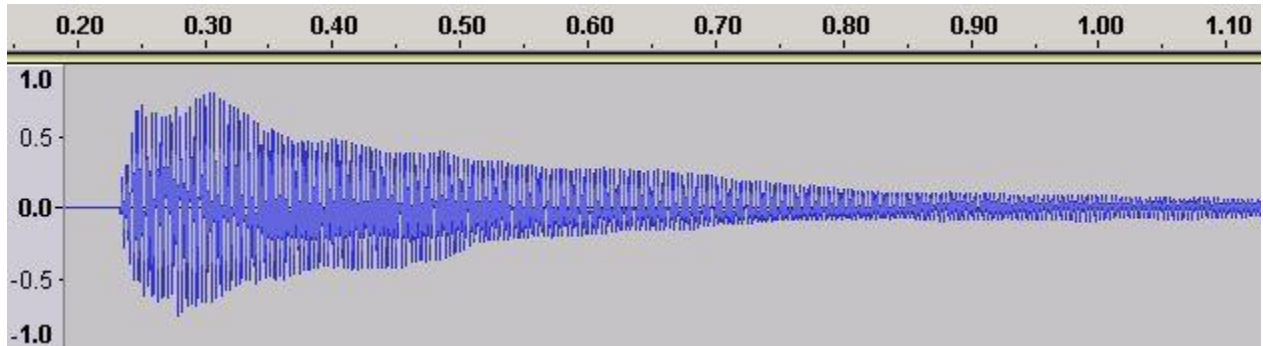
2.2.3 Äänen dynaamiset ominaisuudet

Äänenväriin vaikuttavat sen yläsävelten lisäksi äänen dynaamiset ominaisuudet, kuten aluke, lopuke ja vibrato. Äänen alukkeella tarkoitetaan sitä, kuinka nopeasti ääni saavuttaa maksiminsa. Esimerkiksi näppäiltäessä kitaran kieltä tai painettaessa pianon kosketinta kuullaan sävel lähes välittömästi, eli tällöin alukkeen kesto on hyvin pieni. Aluke sisältää usein paljon epäharmonisia osääneksiä ja on myös amplitudiltaan suurempi, kuin äänen lopullinen sointiosa. Tämän voi nähdä helposti tarkastelemalla äänen verhoikäyrää. Alukkeella on usein merkittävä rooli soitinten äänten erottamisessa toisistaan, vaikka sen kesto onkin vain murto-osa äänen soinnista. On huomattu, että jos eri soittimilla soitetuista äänistä poistetaan alukkeet, on soittimia vaikeampi tunnistaa virheettömästi. Jotkin instrumentit ovat helpommin tunnistettavissa, kuin toiset, esimerkiksi klarinetin ja oboen erottaa toisistaan usein ilman alukettakin, mutta viulu ja pasuuna ovat jo vaikeammin tunnistettavia. (Saldanha, E., L., and Corso, J., F., (1964), 2023).

Äänen lopukkeella tarkoitetaan sitä, kuinka kauan kestää, että äänen arvo laskee aloituksesta minimiarvoonsa. Esimerkiksi kitaran kielen äänen lopuke on melko pitkä, sillä kitarasta näppäilty ääni saavuttaa huippunsa lähes heti lyhyen alukkeensa ansiosta, mutta sen sammuminen taas kestää pitkään.

Vibratosta puhuttaessa voi aiheutua väärinymmärryksiä, sillä osa ihmisistä tarkoittaa äänen vibratolla äänen taajuuden edestakaista muutosta ajassa, kun taas osa tarkoittaa sillä äänen voimakkuuden huojuntaa. Onkin parempi erotella nämä termit

taajuusvibratoksi ja amplitudivibratoksi sekaannuksien välttämiseksi. Usein kuitenkin taajuusvibratoon liittyy myös hieman samanaikaista äänen voimakkuuden muutosta, eli nämä kaksi tilannetta eivät ole toisiaan poissulkevia. Yhdessä äänen aluke, lopuke ja vibrato muodostavat äänen verhokäyrän.



Kuva 1: Pianon keski-C ja sen verhokäyrä (ZyTrax, Inc., (2015)).

Kuvassa nähdään Audacity-ääniohjelman näkymä pianon keski-C:n äänitteestä. Kuvasta huomataan äänen lyhyt aluke, sen jälkeinen sointiosa ja lopuke.

Äänen dynaamisten ominaisuuksien ja niitä tuottavien soittimien tunnistusta on selvitetty kokeellisesti. Kokeissa on huomattu, että jos samalla soittimella soitetaan sama sävel vibraton kanssa ja ilman, vibraton kanssa soitettu ääni yhdistetään useammin oikein siihen soittimeen, joka äänen aiheutti. Samoin ääni, jossa on mukana aluke, yhdistetään useammin oikeaan soittimeen, kuin ääni, josta aluke on leikattu pois. Lopukkeella ei ole huomattu olevan yhtä isoa vaikutusta äänen tunnistamisessa (Saldanha, E., L., and Corso, J., F., (1964), 2026). Soittimen tunnistus riippuu usein soitettun äänen alukkeesta, sävelkorkeuden tunnistus taas sointiosasta ja tilantuntu lopukkeesta (Sibelius Akatemia, (2009)).

2.2.4 Äänien Fourier-analyysi

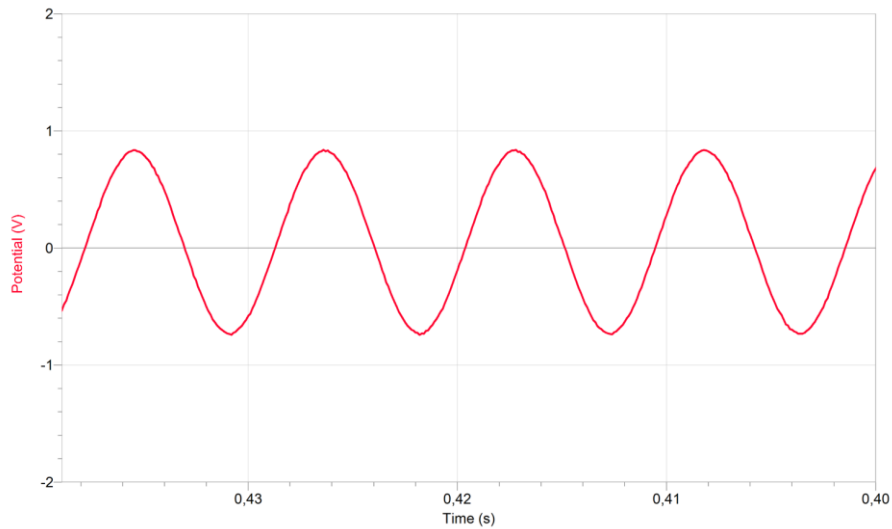
Ääniä tutkittaessa on informatiivista tutkia äänen sisältämiä osääneksiä ja niiden intensiteettejä. Tässä auttaa äänten Fourier-analyysi, joka on matemaattinen työkalu, joka hajottaa ääniaallon sen pienimmiksi rakennusosiksi. Kaikki havaittavat äänet koostuvat monista taajuuksista, joten kaikki nämä äänet ovat hajotettavissa komponentteihin tällä menetelmällä.

Nämä komponentit kuvaavat kaikkia eri oskillaatioita väliaineen paineenvaihtelussa. Eriteltynä muusta äänestä, tällaista yksittäistä pienintä alkutekijää voidaan matemaattisesti kuvata sinikäyrällä (Titze, I. R. (1994), 117).

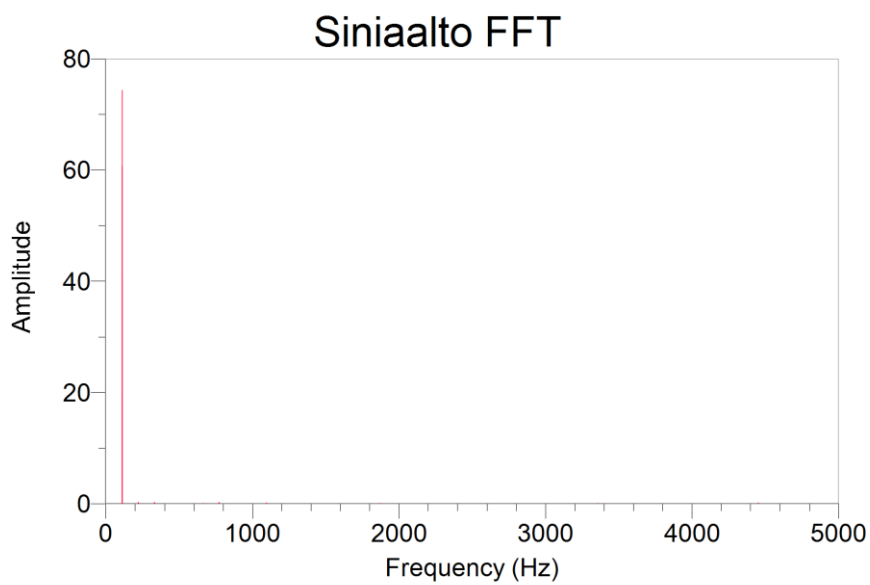
Monissa audio-ohjelmissa on mahdollista suorittaa niin kutsuttu ”Fast Fourier transform”, FFT, joka on algoritmi, joka laskee tietyn signaalin osion diskreetin Fourier-muunnoksen. FFT siis suorittaa analyysin tutkittavan äänen taajuuskoostumuksesta ja esittää sen spektrikuvaajana, jossa on toisella akselilla taajuus ja toisella esimerkiksi

suhteellinen amplitudi. Tällaisesta kuvaajasta on helppo tarkastella eri yläsävelten määrää äänessä.

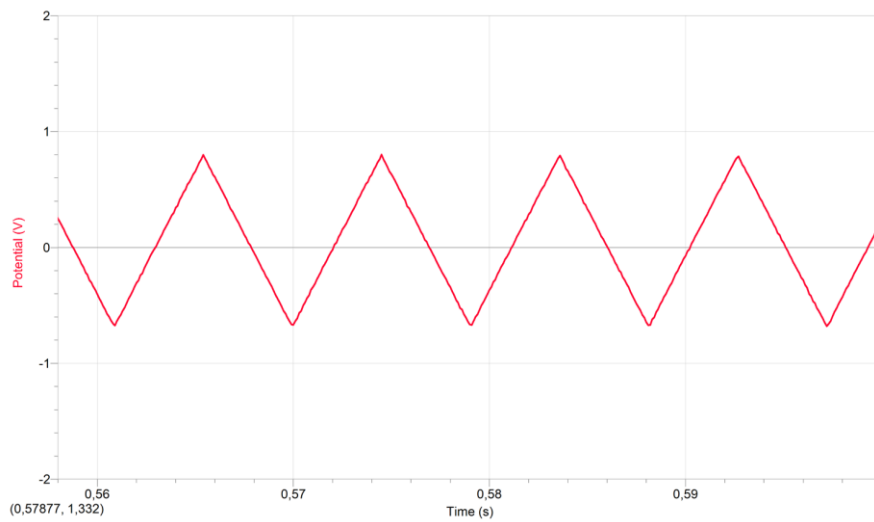
Seuraavassa on esimerkkinä kolmesta eri aaltomuodosta tehdyt FFT-kuvaajat. Kuvaajat on tehty mittaamalla jännitettä LoggerPro-mittausohjelmalla.



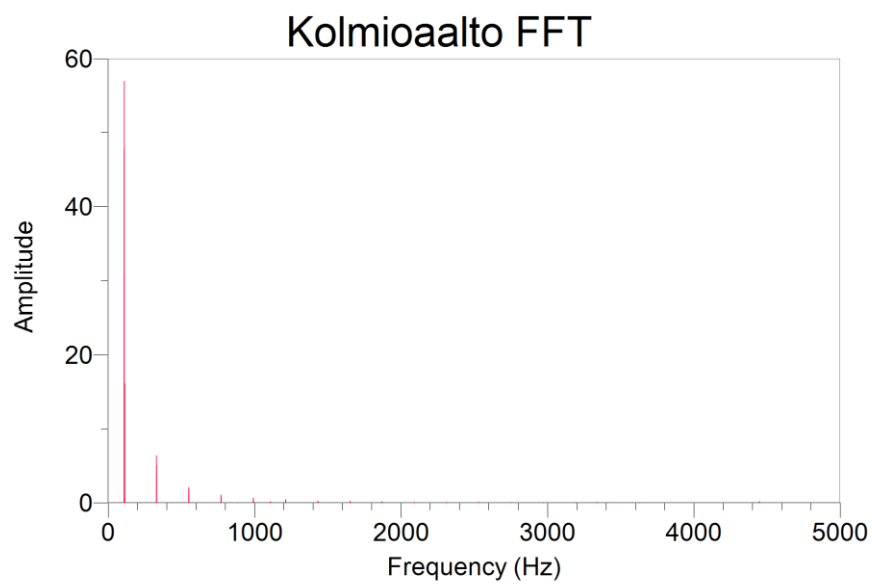
Kuva 2: Siniaallon aika-jännite-kuvaaja



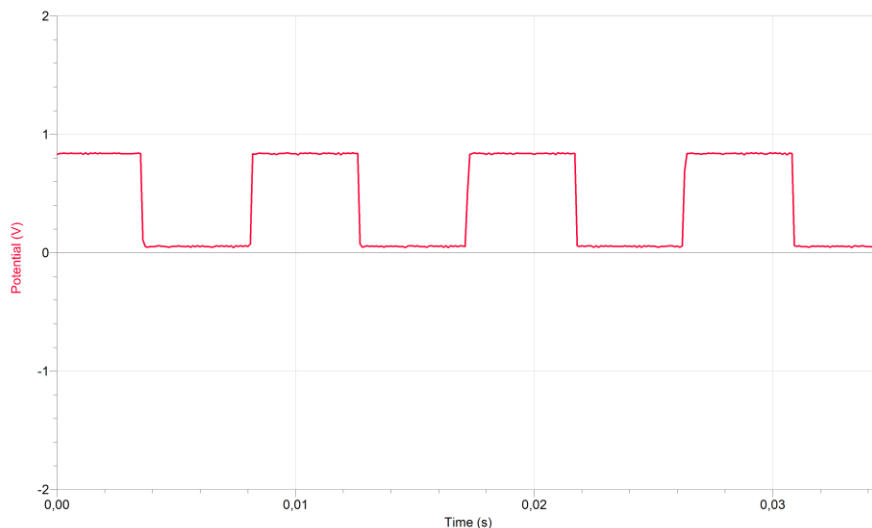
Kuva 3: Siniaallon spektri (110 Hz)



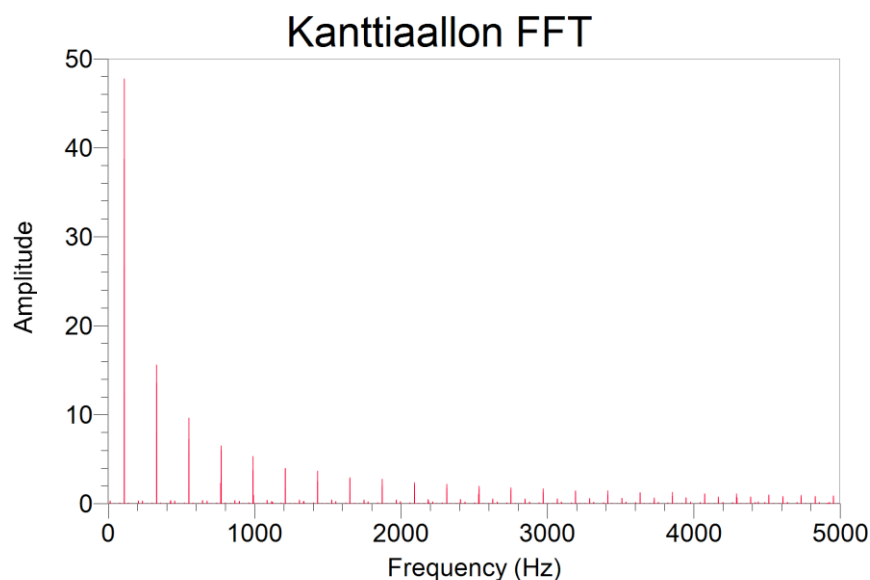
Kuva 4: Kolmioaallon aika-jännite -kuvaaja



Kuva 5: Kolmioaallon spektri (110 Hz)



Kuva 6: Kanttiaallon aika-jännite –kuvaaja

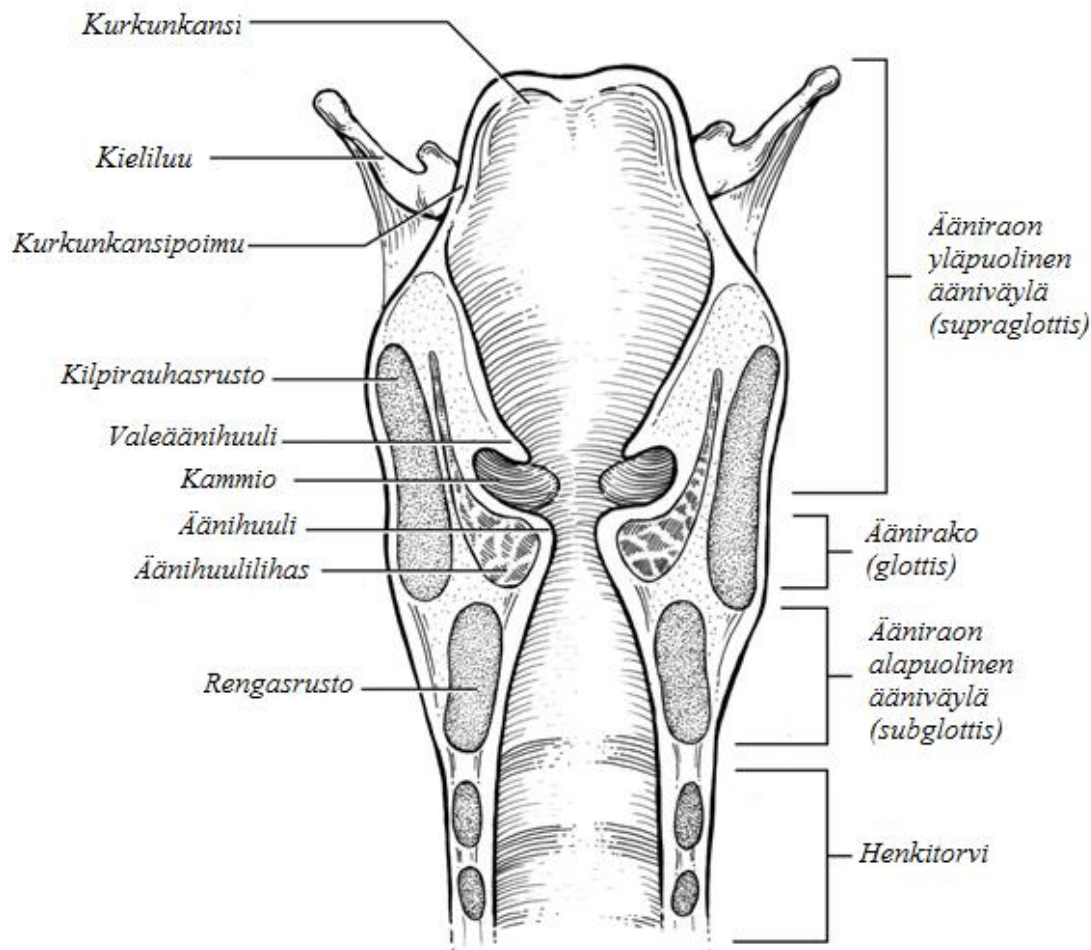


Kuva 7: Kanttiaallon spektri (110 Hz). Tasajännitekomponentti (0 Hz) poistettu.

2.3 Ihmisen äänentuottoelimistö

Jotta ymmärrettäisiin paremmin äänen syntyä ihmisen elimistössä, on syytä tarkastella ihmisen äänentuottoelinten fysiologiaa. Seuraavassa esitellään tärkeimmät äänentuotosta vastaavat elimet ja niihin liittyvät rustot ja lihakset.

Kurkunpää. Äänentuottoon vaikuttavat monet eri elimet ihmisen kehossa, kuten keuhkot, pallea, pää ja sen ontelot ja kurkunpää. Koska äänihuulet sijaitsevat näistä kurkunpäässä ja todellinen ääni saa alkunsa äänihuulten liikkeestä, on tärkeää ymmärtää kurkunpään toimintaa ja sen osia, jotta saisi kokonaiskuvan äänenmuodostuksesta. Kurkunpää itse sijaitsee henkitorven ja nielun välissä ja koostuu rustoista (Rossing, T., D. (1990), 312). Rustojen ja lihasten toiminta hallitsee monia äänen laatuun ja syntyyn vaikuttavia ominaisuuksia.



Kuva 8: Poikkileikkaus kurkunpäästä, Cambridge university press (muokattu)

Kurkunpään rustot. Kilpirusto koostuu kahdesta laattamaisesta palasta, jotka ovat liittyneet toisiinsa muodostaen kulman 90-120 asteen väliltä. Aikuisten miesten kilpirustossa tämä kulma on pienempi, kuin naisilla tai lapsilla ja tämä havaitaan ulkonemana kaulassa, aataminomenana. Suoraan kilpiruston alapuolella sijaitsee rengasrusto, joka on kiinteä rengas, joka ympäröi kurkunpään ilmatien kokonaan. Rengasruston takaosan yläpuolella sijaitsevat pyramidin muotoiset kannurustot. Näiden rustojen takaosassa sijaitsee kaksi lisäkettä, taempana lihaslisäke ja edempänä äänihuulilisäke. Niiden toimintaa säätelemällä voidaan äänihuulia joko liikuttaa lähekkäin tai liikuttaa erilleen. Tämän mahdollistaa taipuisa rengas-kannurustonivel (Titze, I. R. (1994), 6-8).

Kurkunkansi. Kurkunpäässä sijaitsee myös kurkunkansi, joka toimii eräänlaisena läppänä niellessä ja estää ruoan menemisen väärään kurkkuun sulkemalla tällöin tien keuhkoihin (Rossing, T., D. (1990), 316). Kun halutaan sulkea reitti kurkunpään läpi, kurkunkansi taipuu alas. Kurkunkansi on liittyneenä kilpirauhasrustoon ja muodostaa kurkunkansikammion etuosan tämän kanssa. Tämä kammio toimii resonaattorina

ääniaaltojen saapuessa sinne äänihuulista (Titze, I. R. (1994), 10). Kurkunkanteen kuuluvat myös valeäänihuulet (Rossing, T., D. (1990), 316).

Kurkunpään lihakset. Kurkunpään toimintaan liittyvät lihakset voidaan jaotella ulkoisiin ja sisäisiin lihaksiin niiden kiinnityskohtien perusteella. Ulkoiset lihakset kiinnittävät kurkunpään sitä ympäröiviin kudoksiin ja rakenteisiin, kun taas sisäiset lihakset kiinnittävät toisiinsa kurkunpään rustoja.

Sisäiset lihakset. Kilpi-kannurustolihakset muodostavat suurimman osan äänihuulista. Ne kiinnittyvät kilpirauhasrustosta kannurustoon. Nämä lihasparit vetävät supistuessaan kannurustoja eteenpäin ja näin lyhentävät ja paksuntavat äänihuulia. Rengas-kilpirustolihasen tehtävä on pidentää äänihuulia nostamalla rengasruston kaartaa ja alentamalla kilpiruston kilpeä. Lihaspari koostuu kahdesta osasta, jotka kulkevat rengasrustosta kilpiruston kilpeen ja kilpirauhasrustoon. Pääasiassa rengas-kilpirustolihasen toiminta vaikuttaa ihmisen äänen sävelkorkeuden hallintaan. Ulkoinen rengas-kannurustolihas vetää supistuessaan äänihuulilisäkkeet yhteen sulkien ääniraon. Nimensä mukaisesti se kulkee rengasruston kaaren yläosista kannuruston lihaslisäkkeeseen. Takaisen rengas-kannurustolihasen tehtävä on liikuttaa äänihuulia erilleen toimien vastaparina ulkoiselle rengas-kannurustolihaselle. Se kulkee rengasruston takapinnalta kannuruston lihaslisäkkeeseen. Äänihuulten lähentäjänä taas toimii kannurustolihas, joka yhdistää kaksi kannurustoa toisiinsa.

Ulkoiset lihakset. Rintalastasta kulkee kieliluuhun kiinnittyvä rintalasta-kieliluulihas, joka supistuessaan laskee kurkunpäättä epäsuorasti lyhentämällä kieliluun ja rintalastan välistä matkaa. Kieliluu on kielen juuressa sijaitseva muusta luurangasta irtonainen luu, joka toimii kiinnekohtana monille lihaksille ja samalla suojelee kurkunpäättä ulkoisilta iskuilta ja vammoilta. Kurkunpäättä alentaa suoraan taas rintalasta-kilpirustolihas, joka alkaa rintalastan takaosasta ja kiinnittyy kilpiruston kilpeen. Kurkunpään nostamisesta vastaa kilpirusto-kieliluu-lihas (*thyrohyoid*), joka kiinnittyy kieliluuhun kilpirauhasrustosta. Kieliluuta laskeva ja taaksepäin vetävä lapa-kieliluulihas (*omohyoideus*) alkaa lapaluusta ja asettuu kieliluuhun (Titze, I. R. (1994), 11-15).

Äänihuulet. Äänen aiheuttaa äänihuulten sulkeutuminen. Äänihuulet sijaitsevat kurkunpäässä ja ne ovat lihaskudoksesta muodostuva poimupari, jotka ovat kiinni kilpirauhasrustossa ja kannurustossa (Rossing, T., D. (1990), 312). Äänihuulten avautumisen ja sulkeutumisen nopeuden määrittävät lähinnä niiden massa ja jännitys. Tähän vaikuttaa lisäksi myös ääniraon alapuolinen ilmanpaine ja sen nopeus (Rossing, T., D. (1990), 313).

Keuhkot. Äänenmuodostus vaatii ilman liikkumista kehon sisällä. Keuhkot ovat vastuussa ilman pumppaamisesta nieluun ja siitä edelleen nenä- ja suuonteloihin, eli ne toimivat energianlähteenä äänentuotossa. Tavallisessa alhaisessa rasituksessa

uloshengitys tapahtuu itsestään autonomisesti, mutta raskaammissa urheilusuorituksissa tai esimerkiksi puheen tuotossa äänihuulten avulla hengityksen apuna käytetään uloshengityslihaksia, joita ovat kylkivälilihakset ja ulommat vatsalihakset (Rossing, T., D. (1990), 311).

Pään ontelot. Ihmisen pään onteloilla on myös oma tehtävänsä äänen muodostuksessa. Joidenkin onteloiden kokoa voi muuttaa halutessaan, mutta joidenkin ei. Nenäontelo on ontelo, joka sijaitsee päässä nenän takana ja jonka kokoa ei voi muuttaa. Aikuisen miehen nenäontelo on noin 12 cm:n pituinen. Suuontelon koko taas on muokattavissa monin eri tavoin liikuttamalla kieltä, kitapurjetta huulia ja hampaita. Suuontelon sisällä suun takaosassa sijaitseva kitapurje säätelee ilman kulkua nielusta nenäonteloon. Kitapurjetta laskettaessa suuontelon muoto muuttuu ja nenäonteloon päätyvät ääniaallot saavat nasaalin värin (Rossing, T., D. (1990), 316).

Ääntöväylä. Äänihuulten värähtelyn aiheuttama ääni kulkeutuu ulos ääntöväylän kautta. Keskimäärin noin 17 cm pitkä ääntöväylä ulottuu äänihuulista huuliin asti ja se sisältää kurkunpään, suu- ja nenäontelon ja nielun. Ääntöväylässä äänihuulten aiheuttamat äänet muuttuvat puheessa tai laulussa kuulluiksi artikuloituiksi äänteiksi. Ääntöväylän muotoa voi muuttaa samoin kuin suuontelonkin muotoa. Eri muodot aiheuttavat ääneen erilaisia akustisia resonansseja. Eli tietyillä ääntöväylän muodoilla ihmisen äänessä korostuvat ääntöväylän ominaisresonanssitaajuuksia vastaavat taajuudet. Ääntöväylän pituuteen voi hieman vaikuttaa nostamalla tai laskemalla kurkunpäästä ja kitapurjetta (Rossing, T., D. (1990), 316).

Ääntöväylän resonanssit. Ääntöväylän monimutkaisen rakenteen voi yksinkertaistaa mallintamalla, jolloin resonanssitaajuuksia on helpompi tarkastella matemaattisesti. Yksinkertainen malli ääntöväylästä on toisesta päästä suljetun putken malli, jossa suljettu pää on ääniraon sulkema ja avoin pää on avonaisen suun huulet (Rossing, T., D. (1990), 320). Mallia voi tarkentaa enemmän ääntöväylän muotoiseksi käyttämällä yhä useampia halkaisijaltaan ja pituudeltaan erilaisia putkia, näin saaden aikaan todellisuutta koko ajan lähestyvän mallin.

Toisesta päästä suljetun putken suljetussa päässä ilma ei liiku, vaan asettuu seisovaan aaltoliikkeeseen liittyvään solmukohtaan. Putken avonaiseen päähän, eli ihmisen tapauksessa suuhun, syntyy vastaavasti kupukohta, sillä siellä ilma on vapaa liikkumaan edestakaisin pitkittäisenä aaltoliikkeenä. Seisovassa aaltoliikkeessä ilman liikkeen solmukohdat vastaavat ilmanpaineen kupukohtia, joissa paine on suuri, kun taas kupukohdat vastaavat paineen solmukohtia, joissa ilmanpaine on pieni. Seisovan aaltoliikkeen solmun ja kuvun välinen etäisyys perustaajuudella on aina $\frac{1}{4}$ aallonpituutta. Alhaisin putken tuottama taajuus on perustaajuus eli ensimmäinen yläsävel. Toisesta päästään suljetuissa putkissa ei esiinny kuin parittomia ominaistaajuuksia, sillä putken avoimeen päähän voi syntyä vain kupu ja suljettuun päähän vain solmu.

Yksinkertaisen putken resonanssitaajuuDET saadaan lausekkeesta

$$f = \frac{nv}{4L}, (n = 1, 3, 5 \dots)$$

Noin 17 cm pitkälle putkelle resonanssitaajuuDET ovat suunnilleen 500, 1500, 2500 Hz (Rossing, T., D. (1990), 320).

On kuitenkin hyvä muistaa, että ihmisen ääntöväylä on muodoltaan monimutkainen, eikä sitä voi tarkkaan mallintaa käyttämällä vain yksinkertaisen putken aaltoliikkeen malleja.

2.4 Äänen syntyminen

Ääntä syntyy, kun keuhkoista lähtevä ilmapirta kulkee keuhkoputken kautta äänihuuliin, jotka liikehdinnällä saavat ilman värähtelemään. Tämä värähtely siirtyy eteenpäin ääntöväylän kautta heijastuen sen seinästä päätyen ulos lopulta suusta.

Tämän lisäksi ääntä voidaan tuottaa melkein missä päin ääntöväylää tahansa joko ilmapirran turbulenssilla tai äkkinäisellä paineen vapauttamisella. Tämän lisäksi pehmytkudokset, kuten huulet, kitapurje tai eri kielen osat voidaan asettaa värähtelemään ääntä tuottaen samaan tapaan kuin äänihuulet (Titze, I. R. (1994), 112).

Ennen ääntämisen alkamista äänihuulet ovat kiinni toisissaan. Kun keuhkojen ilmanpaine kasvaa niiden alapuolella tarpeeksi, irtoavat äänihuulet toisistaan. Tämän jälkeen äänihuulet iskeytyvät toisiaan vasten takaisin sulkien näin taas väylän ilmalta. Ääni syntyy tässä sulkeutumistapahtumassa samaan tapaan kuin käsien taputuksessa. Äänihuulten värähtely ei tuota ääntä samalla tavalla, kuin kitaran tai pianon kielten värähtely. Kuten taputuksessa, mitä kovempaa äänihuulet iskeytyvät toisiaan vasten, sitä kovempi ääni tuotetaan. Mitä tiuhemmin ne avautuvat ja sulkeutuvat, sitä korkeampi sävelkorkeus tuotetaan (Sataloff, R., T., 9).

Äänen tuottamiseen liittyy siihen aina paineen vaihteluita. Ilmanpaineen kasvaessa vaikkapa keuhkojen pumppauksen seurauksena, kasvaa ilman tiheys ja väliaine tiivistyy kasaan. Jos taas paine laskee alle normaalin ilmanpaineen, pienenee vastaavasti ilman tiheys ja väliaine laajenee (Titze, I. R. (1994), 113).

Vokaalin aluke-lopuke -luonne (dynaamiset ominaisuudet) määräytyy ääniraon klikkien tai glottaaliklusiilien perusteella. Glottaaliklusiiliksi kutsutaan puheessa kuultuja ääniä, jotka syntyvät äänihuulten kokonaisessa sulkeutumisessa (Iso suomen kieliooppi, § 36, 2008). Kovat alukkeet äänissä saavat äänen kuulostamaan ponnisteluja vaativalta, kun taas pehmeät eivät. Myös nestettä äänihuulten lähistöllä liikuttamalla voi saada aikaan erilaisia ääniä. Näin tuotetut äänet kuulostavat märiltä ja korisevilta (Titze, I. R. (1994), 116-117).

Kun äänihuulet eivät ole käytössä, eli äänirako on auki, ilma virtaa keuhkoista esteettä ulos suusta. Kun äänihuulet aktivoidaan, sulkeutuu äänirako, ja keuhkoista tuleva ilmapatsas ikään kuin törmää äänihuulten alaosaan. Tämän voi ajatella tapahtuvan

samoin tavoin kuin niin kutsutun ”vesivasara-efektin” (Chen C., J., (2016), 4). Kun käyttää kylpyhuoneen hanaa täydellä teholla ja yhtäkkiä sulkee hanan välittömästi, kuulee pienen tömäyksen, joka johtuu siitä, että ulos matkalla oleva vesimassa törmää suljettuun hanaan ja kuuluu ääni tömäyksessä. Tätä voi käyttää analogiana puhuttaessa äänen synnystä äänihuulissa, sillä samalla lailla keuhkoista tuleva ilma törmää suljettuna olevien äänihuulten alapintaan. Erona on se, että ilman tiheys on pienempi ja kokoonpuristuvuus suurempi, kuin vedellä. Äänihuuliin törmänneen ilmapulssin kineettinen energia välittyy eteenpäin muuttuen akustiseksi energiaksi, saaden äänihuulten yläpuolisen ilmapatsaan värähtelemään aiheuttaen eräänlaisen pulssin. Ilmapulssi kulkeutuu ääntöväylässä eteenpäin ja kulkeutuu lopulta ulos suusta. Äänneltäessä ja laulettaessa äänihuulet avautuvat ja sulkeutuvat nopeaan tahtiin ja näitä ilmapulsseja syntyy jatkuvasti. Äänihuulten sulkeutumisen aiheuttamana akustisen aallon muodon määrää ääntöväylän sen hetkinen muoto, mikä osittain aiheuttaa myös muodostuneen äänen värin (Chen, C. J. (2016), 4).

Ihmisen tuottaman äänen akustiseen voimaan sekä äänenväriin vaikuttaa ääniraon värähtelyiden avoimen jakson kesto verrattuna suljetun jakson keston. Pieni avoimen jakson suhde suljettuun jaksoon saa aikaan äänen, joka havaitaan rämeänä. Jos suhdeluku taas on iso, eli lähestyy yhtä, äänen laatu on huilumainen. Ääniraon leveys vaikuttaa siihen, onko suhdeluku suuri vai pieni. Se kasvaa äänihuulilisäkkeiden loitonnuksessa ja laskee lähennyksessä. Tyypilliset avoimen ja suljetun vaiheen suhteen arvot miehillä ovat välillä 0,4-0,7 ja naisilla hieman tätä korkeammat. Myös se, puhuuko tai laulaako hennolla vai kovalla äänellä vaikuttaa avoimen jakson suuruuteen (Holmberg, Hillman & Perkell, (1988), 525-527). Alle 0,4 olevat arvot koetaan ”puristetuiksi”, arvot, jotka ovat yli 0,7 koetaan ”henkäyksen kaltaisiksi” (Titze, I. R. (1994), 115-116).

Kun lauletaan äänekkäästi, kasvaa ääniraon sulkeutuneen jakson aika verrattuna avoimeen jaksoon. Tämä havaitaan vertailemalla ääniraon ilmapinnan aaltomuotoja, glottogrammeja. Kovaa laulettaessa suurempi osa äänienergiasta esiintyy korkeilla yläsävelillä kuin kun jos laulettaisiin hiljaa. Suoritettaessa fourier analyysi, huomataan, että glottogrammien jyrkkien aaltomuotojen spektreillä esiintyy paljon yläsäveliä. Yläsävelet ovat myös yleensä vahvemmat miehen nk. rintaäänellä tuotetussa äänessä, kuin naisen, vaikka miehen perustaajuus tällöin onkin heikompi. Naisilla taas yläsävelet ovat miehiä vahvemmat nk. falsetilla lauletuksessa äänessä. (rekistereitä ja niihin liittyviä mekanismeja tarkastellaan jäljempänä) (Rossing, T., D. (1990), 360-362).

2.4.1 Formanteista

Formantit ovat ääntöväylän resonansseja ja joskus tapahtuu niin, että tälle taajuudelle osuu jokin äänen osaaääneksistä ja tällöin spektrissä esiintyy piikki tällä formanttitaajuudella. Eri vokaalien tapauksessa on kyseessä erilaiset formanttitaajuudet ja juuri nämä taajuudet antavat vokaalille sen ominaisen soinnin. Nielun ja kielen ym. asennolla muutetaan tuotettua vokaalia. Formantit ovat siis kuin

verhokäyriä, jotka muokkaavat äänilähteen tiettyjen yläsävelten amplitudia. Jokainen formantti liittyy yhteen tai useampaan resonanssiin ääntöväylässä. Formanttitaajuudet ovat riippumattomia lähdespektristä (Rossing, T., D. (1990), 319).

Äänihuulten värähtely määrää tuotetun puheen tai laulun sävelkorkeuden ja sen intensiteetin. Näiden äänten spektreihin vaikuttaa kuitenkin myös ääntöväylä ja sen resonanssit. Resonanssit aiheuttavat spektrierot, joilla eri foneemit erotetaan toisistaan, esimerkkinä vaikkapa sanojen kana ja kama välinen yhden foneemin ero. Foneemilla tarkoitetaan äännejärjestelmän yksikköä, jonka tehtävä puheessa on erottaa merkityksiä sanoissa (Iso suomen kielioppi, § 1, 2008). Spektreissä näkyy sävelkorkeudelle ominaisia piikkejä, jotka ovat kokonaislukukerrannaisia perustaajuudesta. Jokaisella vokaalilla on sille ominaiset sävelkorkeudesta riippumattomat huiput, formantit (Rossing, T., D. (1990), 319).

Vokaalin ensimmäisen ja toisen formantin paikka vaihtelee hieman henkilöstä riippuen, sillä formanttitaajuudet riippuvat ääntöväylän muodosta. Naisilla ja lapsilla on lyhyemmät nielut kuin miehillä, ja lapsilla on lyhyemmät ääntöväylät kuin naisilla (Sundberg, J., 2019, 127-128). Tämän lisäksi äänielinten koossa esiintyy myös sukupuolesta ja iästä johtuvia vaihteluita.

Kurkunpään asentoa muuttamalla saadaan myös muutettua formanttitaajuuksia. Nostettu kurkunpää aiheuttaa formanttitaajuuksien nousun ja laskettaessa kurkunpäästä taas formanttitaajuuksien laskun. (Sundberg, J., 2019, 135-136).

Aikaisemmin mainittujen putkimallien avulla on helpompi mallintaa vokaaleja, kuin konsonantteja. Formantteja kuvaillessa käytetään amplitudia puhuttaessa resonanssin korkeudesta ja kaistanleveyttä puhuttaessa leveydestä (Rossing, T., D. (1990), 321).

Laulajan laulaman äänen sävelkorkeus ei vaikuta syntyneen vokaalin formanttien taajuuksiin. Nämä formantit voi kuitenkin ääntöväylän muotoa muuttamalla virittää laulettaessa osumaan yhteen tai useampaan laulettuun äänen yläsäveleen (Rossing, T., D. (1990), 348).

Vaikka laulaminen ja puhuminen ovat molemmat fonaatiota ja ääni syntyy molemmissa tapauksissa samaan tapaan, on näissä kuitenkin joitain eroja. Tutkimalla ääntöväylän röntgenkuvia ja huulten asentoja puhuttujen ja laulettujen vokaalien välillä on huomattu neljä eroavaisuutta artikulaatiossa: Kun vokaali lauletaan, on kurkunpää matalalla, leuat avoimemmat, kielen pää on edempänä takavokaaleissa [u], [o] ja [a] ja huulet ovat ulkonevat etuvokaaleissa (Rossing, T., D. (1990), 350); (Sundberg, 1974, 1).

2.4.2 Vokaaleista ja niiden muodostuksesta

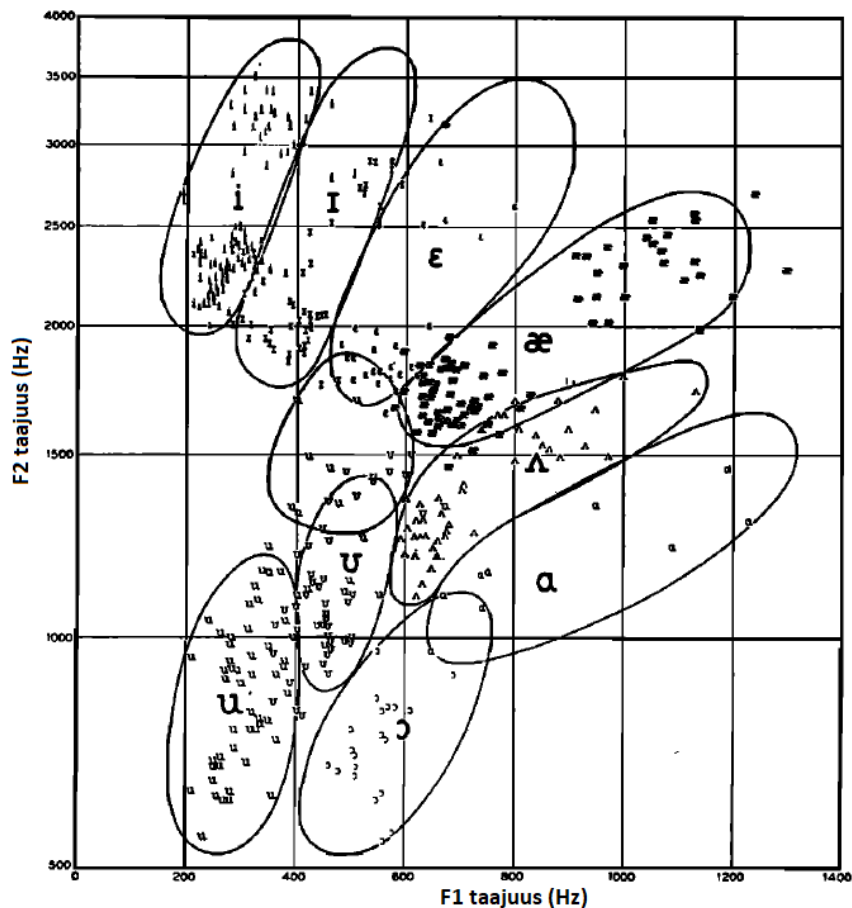
Ihminen kykenee tuottamaan monenlaisia ääniä kehittyneiden elinten ja pienten lihasten avulla. Tämä mahdollistaa yksityiskohtaisten äänteiden muodostamisen ja tarkan kommunikoinnin puheen kautta. Muilla eläimillä ei ole mahdollisuuksia yhtä

monipuoliseen ääniviestintään kuin ihmisillä. Eri kielissä käytetyt äänteet voidaan jakaa yksinkertaistetusti vokaaleihin ja konsonantteihin. Etenkin vokaalien muodostus on tätä tutkielmaa silmällä pitäen kiinnostava seikka.

Joka tapauksessa kaikki ihmisen tuottamat äänet muodostuvat jostain tietystä ääntöväylän konfiguraatiosta. Vokaalien tapauksessa ääntöväylä on avoimena, mutta äänteissä kuten hymisemisessä tai sihisemisessä on ääntöväylä suljetumpi. Monet tutkimukset ovat kuvanneet vokaalien muodostumista ääntöväylässä niin kutsutulla lähde-suodatin -teorialla (ks. luku 2.6). Tämän teorian mukaan ääntöraon jaksollinen ilmavirta toimii äänen lähteenä, joka etenee ääntöväylään, joka taas toimii taajuussuodattimena. Eli teorian mukaan äänihuulet tuottavat äänen, jossa on monia taajuuksia ja näistä suodatetaan ääntöväylässä osa pois niin, että saadaan haluttu vokaali (Titze, I. R. (1994), 136).

Äänen synnyn teorioita tarkastellaan enemmän luvussa 2.6.

Vokaalit syntyvät, kun ääntöväylä on asetettu sellaiseen muotoon, joka saa aikaan äänen, jossa on korostuneena tietty taajuudet, formantit. Jokainen vokaali tuotetaan keskenään erilaisella ääntöväylän muodolla (Sundberg, J., 2019, 128). Formantteja on vokaaliäänteissä monia, mutta vokaalien tunnistus tapahtuu niiden kahden alimman formantin taajuuksien perusteella (Peterson, G., E., Barney, H., L., (1952), 182). Nämä formantit F1 ja F2 voivat vaihdella taajuudeltaan suurellakin alueella riippuen henkilöiden iästä ja sukupuolesta. Tämän arvoalueen voi piirtää F1-F2 -kuvaajaan (Peterson, G., E., Barney, H., L., (1952), 183).



Kuva 9: Toisen formantin taajuus (F2) vs. ensimmäisen formantin taajuus (F1) miesten ja lasten puhumille vokaaleille. (Peterson, G., E., Barney, H., L., (1952), 183) (muokattu)

Jos tarkastellaan miesten, lasten ja naisten kahta ensimmäistä formanttia, niin lasten formanttien taajuudet ovat pääsääntöisesti korkeimmat (noin puoli oktaavia korkeammalla, kuin miesten), miesten matalimmat ja naisten näiden kahden välissä. Kuvassa 8 on esitetty vain nämä miesten ja lasten formanttien muodostamat ääripäät ja jätetty naisilta saadut mittaukset pois (Peterson, G., E., Barney, H., L., (1952), 183).

Jos puhuttu sana sisältää konsonantti-vokaali-konsonantti -rakenteen, riippuu puhutun vokaalin ääntämys puhujan murteesta. Vokaalin lausuminen voi tällöin erota mitatuissa arvoissaan muita murteita puhuvien ihmisten vokaaleista (Peterson, G., E., Barney, H., L., (1952), 175). Tämän takia tässä tutkielmassa tutkitaan ainoastaan puhtaita vokaaleja, eikä sanoissa esiintyviä vokaaleja.

Vokaaleista puhuttaessa käytetään usein termejä etu- ja takavokaalit sen mukaan, missä osassa suuta ne muodostuvat. Nämä termit kuvaavat kielen korkeinta kohtaa suussa näitä vokaaleja lausuttaessa. Suomen kielessä etuvokaaleja ovat a, o ja u ja loput ovat takavokaaleja (Finn Lectura, (2001)).

Vokaalit voivat "sijoittua" eri paikkoihin suussa (korkealle, alhaalle) riippuen kielen sijoittumisesta suussa (Peterson, G., E., Barney, H., L., (1952), 178). Vokaalin [a] tapauksessa kieli on sijoittunut alhaalle ja taakse, vokaalissa [i] korkealle ja eteen ja

vokaalille [u] korkealle ja taakse. Näitä kutsutaan kulmavokaaleiksi, sillä niissä on läsnä äärimmäistä kielen sijoittumista. Muiden vokaalien tapauksessa kieli sijoittuu jonnekin näiden paikkojen välille. Taajuusgraafilla (F1, F2) kulmavokaalit sijoittuvat myös äärimmäisiin paikkoihin. Vokaalin [ə] tuottamiseen tarvittu ääntöväylän muoto on taas kaikista paras approksimaatio avoimelle putkelle (Titze, I. R. (1994), 149).

2.4.3 Laulajan formantti

Taitavien laulajien, etenkin oopperalaulajien äänessä esiintyy usein laulettulle vokaalille tyypillisten formanttien lisäksi niin kutsuttu laulajan formantti, joka sijaitsee noin 2500-3000 Hz kohdalla. Tämä formantti esiintyy laulettun äänen spektrissä suunnilleen samalla taajuusalueella riippumatta siitä, mitä vokaaleita tai miltä sävelkorkeudelta niitä lauletaan. Laulajan formantti on usein haluttu lisä ääneen, etenkin jos äänen on tarkoitus kantaa vahvistamattomana suuren orkesterin yli. Tällöin noin 3000 Hz taajuudella esiintyvän intensiteettiäkin kuulee selvemmin, kuin monia muita alhaisia taajuuksia, sillä monet soitinten äänet osuvat samoille taajuuskaistoille.

Laulajan formantti voidaan selittää akustisesti formanttien 3, 4 ja 5 lähentymisellä eräänlaiseksi ”ryppääksi”. Kun formanttitaajuuksia lähestyvät toisiaan, kasvavat näiden amplitudit. Laajennettu nielu ja alhaalla oleva kurkunpää ovat tärkeitä seikkoja laulajan formantin synnylle. Laulajan formantin keskus sijaitsee hieman alempana matalille äänityypeille, kuten basso ja baritoni ja taas hieman korkeammalla korkeammille äänityypeille, kuten tenoreille (Sundberg, J., 2019, 129).

Laulajan formantin oletetaan johtuvan kurkunpään korkeuden vaihtelusta. Laskettu kurkunpää muodostaa nielun kanssa resonanssiontelon (Sundberg 1974) ja lisäksi vaikuttaa myös vokaalien äänenväriin muuttaen niitä ”tummemmiksi”, kun taas nostettu kurkunpää tuottaa kirkkaampia sointuja. Kurkunpää voi laskea keskimäärin noin 15 mm lauletaessa. Laulajan formantti ei yleensä esiinny M2 -mekanismilla (mekanismien selitykset ks. luku 1.6) tuotetussa äänessä (Rossing, T., D. (1990), 350-351).

Laulajan formantti tulee esiin parhaiten matalammilla äänillä, sillä silloin formanttialueelle todennäköisimmin osuu jokin osääneksistä, sillä osäänen välinen välimatka on aina perustaajuuden suuruinen. Jos lauletaan korkeampia säveliä, nousevat sävelten perustaajuuksia jo niin korkeiksi, että ne eivät välttämättä osu tälle formanttialueelle, eivätkä siten niiden amplitudit vahvistu. Tämä on yksi syy, miksi naisilla ei esiinny laulajan formanttia niin suurella määrällä, kuin miehillä, sillä naisten puheen ja laulun perustaajuus on huomattavasti miehiä korkeampi (Sundberg, J., 2019, 130).

2.5 Lauluäänen rekisterit

Ihminen kykenee tuottamaan ääniä suurelta taajuusväliltä. Lauletaessa tämä on usein tarpeen, sillä monet kappaleet vaativat laulajalta kykyä tuottaa miellyttävän kuuloisia ääniä parinkin oktaavin alalta. Ihmisen matalimman ja korkeimman tuotetun äänen

väliä kutsutaan äänialaksi. Perinteisessä laulunopetuksessa, etenkin klassisen laulun alalla, jaotellaankin ihmiset usein äänialojensa ja äänityyppiensä mukaan eri ryhmiin, kuten basso, baritoni, tenori, altto tai sopraano. Esimerkiksi oopperassa usein esitettävät roolit jakautuvat näiden äänityyppien mukaan.

Ääniala sisältää kuitenkin kaikilla ihmisillä eri rekistereitä, joista laulunopetuksessa käytetään monia kirjavia nimityksiä riippuen koulukunnasta. Suurimmalle osalle tuttu rekisterinvaihdos äänentuotossa löytyy esimerkiksi jodlaamisesta. Siinä kuultu hyppäys äänen soinnissa tehdään tahalliseksi rekisterinvaihdoksella. Näitä rekistereitä on monesti kuvattu rintaääneksi ja falsetiksi tai pää-ääneksi laulunopetuksen piirissä. Jodlaaja saavuttaa genreen kuuluvan efektin vaihtamalla rintarekisteristä falsettiin niin, että rekisterinvaihdos saadaan kuuluviin. Pitkään on ollut etenkin laulunopettajien kesken suuri määrä eri näkemyksiä siitä, montako rekisteriä ihmisen äänessä on ja miksi niitä kutsuttaisiin (ks. kuva 9). Tämän takia on tärkeä selvittää tätä tutkielmaa varten ihmisen eri rekisterit ja niistä käytetyt termit ja käyttää valittua terminologiaa yhdenmukaisesti.

TABLE 4.

Synthesis of the Main Studies Carried Out on Registers Since 1840

Authors	Year	Subjects	Production	Analysis	Registers
Müller ⁴²	1840	Excised human larynx (male)	Sustained tones	Direct observation with strain variation	2 (Chest and falsetto)
Garcia ^{1,43,44}	1840	Male and female	Sustained tones	Breath support	2 For male and female voice (poitrine and fausset-tête)
Bataille ⁴⁵	1855	Male and female	Sustained tones	Laryngoscope	3 (Poitrine, fausset, and tête)
Benhke ²	1861	Not precise	Sustained tones	Laryngoscope	2 (Poitrine and fausset)
	1880	Male and female	Sustained tones	Laryngoscope	2 For male voice (thick and thin)
					3 For female voice (thick, thin, and small)
Husson and Djan ⁴⁶	1952	Male and female, singers	Sustained tones	Tomography	2 For male and female voice (first and second registers)
Van den Berg ⁸	1960	Excised human larynx (male)		Direct observation	
Hirano et al ¹⁶	1970	Male and female: 2 For both gender	Sustained tones and scales	EMG	3 For male and female: Chest, mid, head (male); Chest, head, and falsetto (female)
Hollien ⁶	1974	Male	Sustained tones	Perception, acoustics, X-rays, and airflow rate	3 (Pulse, modal, and loft)
Colton ^{15,7}	1972, 1973	Male: singers and nonsingers	Sustained tones	Acoustics and perception	2 (Modal and falsetto)
Large et al ^{17,47,48}	1970, 1972	Male and female	Isoparametric tones	Airflow rate	3 For male voice (chest, head, and falsetto)
					2 For female voice (chest and middle)
Gay et al ³	1972	Male and female	Sustained tones	EMG	2 Chest falsetto
Lecluse ¹⁴	1977	Male	Sustained tones	EKG	2 Chest and falsetto
Van Deinsen ³¹	1981	Male and female	Sustained tones	EMG	2 For male voice: chest, and falsetto
					4 For female voice: chest, head, little, and whistle
Kitzing ⁵	1982	Male	Sustained tones, glissandos, and scales	EKG and photoglottography	2 Chest and head (trained singer)
		1 Trained			Chest and falsetto (untrained singer)
		1 Untrained			
Roubeau ²³	1993	Male and female, (singers and nonsingers)	Glissandos and sustained tones	EKG, acoustics, and EMG	4 Mechanisms for male and female (0, 1, 2, and 3)
Henrich ²¹	2001	Male and female, singers	Glissandos and sustained tones	EKG and acoustics	4 Mechanisms for male and female (0, 1, 2, and 3)

Abbreviations: EMG, electromyography.

Kuva 10: Yhteenveto rekisterien tutkimuksista 1840-luvulta 2001-luvulle (Roubeau, B., Henrich, N., Castellengo, M., (2008), 435)

Tässä tutkielmassa käytetään tutkimuksen (Roubeau, B., Henrich, N., Castellengo, M., (2008)) käsitystä, jonka mukaan ihmisen äänessä on neljä eri rekisteriä, jotka liittyvät kurkunpään erilaisiin äänentuottomekanismeihin. Lisäksi selvennetään termejä kuten rintaääni, falsetti, pää-ääni ja mixed voice.

Ihmisen äänen mekanismeja on mahdollista tutkia esimerkiksi nieluun asetetun kameran avulla. Toinen tutkittavalle häiriöttömämpi tapa on käyttää elektroglossografiaa. Se on laite, jonka avulla voidaan tutkia äänihuulten kosketuspintoja tutkitavan ihmisen äännessä. Laitteeseen on kytketty elektrodipari, jotka asetetaan tutkitavan kaulalle. Elektrodien läpi johdetaan sähkövirtaa ja kaulan admittanssin muutoksista voidaan päätellä äänihuulten asento. Kun huulet ovat kosketuksissa, admittanssi kasvaa ja taas pienenee, kun äänihuulet erkanevat (Henrich, N., Castellengo, M., Doval, B., d'Alessandro, C., (2003), 1).

Rekisterisiirtymän voi havaita käyttämällä elektroglossografia ja tulkitsemalla sen signaalia (Henrich, N., Castellengo, M., Roubeau, B, (2003), 1). Rekisterinvaihdos näkyy amplitudimuutoksena. Nämä rekisterisiirtymiin liittyvät kurkunpään mekanismit ovat samanlaisia miesten ja naisten välillä. Rekisterinvaihdoksiin liittyy muutos äänihuulten värähtelyprosessissa, eli rekisterivaihdokset liittyvät erilaisiin ääniraon asetuksiin (Henrich, N., Castellengo, M., Roubeau, B, (2003), 2-3).

Tutkittaessa ihmisen ääntä, kun koehenkilö lauloi nousevan glissandon (siirtymä liukuen sävelestä toiseen), huomattiin rekisterinvaihdoksessa taajuuden hyppy ylöspäin. Myös laskevassa glissandossa nähtiin vastaava hyppy taajuudessa. Tällainen tapahtuma on väistämätön rekisterinvaihdoksessa, mutta koulutettujen laulajien tapauksessa tämän ”epäjatkuvuuskohdan” havaitseminen ei välttämättä ole mahdollista ihmiskorvalla (Roubeau, B., Henrich, N., Castellengo, M., (2008), 426-427). Tällaisia taajuushyppyjä löytyi kolmesta eri kohdasta, jakaen ihmisäänen täten neljään rekisteriin. Alueet, joissa tällainen hyppy taajuudessa tapahtuu, on nimetty eri kurkunpään mekanismien tai konfiguraatioiden mukaan nollasta kolmeen, M0, M1, M2 ja M3 (M = mechanism) (kuva 9 ja 10, Henrich).

TABLE 5.
Classification of Registers Depending on the Laryngeal Mechanisms Involved

Mechanism M0	Mechanism M1	Mechanism M2	Mechanism M3
Fry	Modal	Falsetto	Whistle
Pulse	Normal	Head (W)	Flageolet
Stroh bass	Chest	Loft	Flute
Voix de	Heavy	Light	Sifflet
Contrebasse	Thick	Thin	
	Voix mixte (M)	Voix mixte (W)	
	Mixed (M)	Mixed (W)	
	Voce finta (M)		
	Head operatic (M)		

Abbreviations: M, men; W, women.

Kuva 11: Terminologian laajuus ja vaihtelevuus (Roubeau, B., Henrich, N., Castellengo, M., (2008), 437)

2.5.1 Ihmisen lauluäänen termistöä

Suurin osa laulettua musiikista tapahtuu kahdella kurkunpään mekanismilla. Näitä mekanismeja on laulunopetuksessa kuvailtu nimillä kuten rintaääni/modaalirekisteri/pää-ääni ja falsetti. Terminologian laajuutta on havainnollistettu kuvassa 10. Kurkunpään mekanismien lisäksi tässä tutkielmassa tutkitaan myös niin kutsutun ”twang” -lauluefektin vaikutusta formantteihin. Termi twang kuvaa tietynlaista ”nasaalia” äänenväriä, jota on kuvailtu lävistäväksi ja kirkkaaksi. Se on vertailtavissa esimerkiksi oboen tai vaakkuvan ankan ääneen (Yanagisawa, E., Estill, J., Kmucha, S., T., Leder, S., B., (1989), 343). Nasaalinen sointi ei kuitenkaan twangin tapauksessa yleensä tarkoita nasaalia resonanssia, vaan nielussa

tapahtuvaa äänen muokkausta ja tällaisen twangin voikin saada aikaan myös estämällä ilman pääsyn nenäonteloihin.

Twangissa on havaittu kurkunkannen aukossa etu- ja takaosaisen halkaisijan pieneneminen, kun kannurustot ja kurkunkansi lähentyivät (Yanagisawa, E., Estill, J., Kmucha, S., T., Leder, S., B., (1989), 344).

Twangissa on havaittu formanttitaajuuksien F1 ja F2 olevan korkeammat, kuin neutraalissa laulussa, kun taas F3 ja F5 ovat siinä matalammat. Twangiin vaikuttavat siis sekä fonaatioon ja resonanssiin liittyvät ominaisuudet (Sundberg, J., Thalén, M., (2010), 659). Mm. nämä seikat tekevät twangin tutkimisesta kiinnostavan kohteen tässäkin tutkielmassa.

Pää-ääni ja falsetti tuotetaan käytännössä aina samalla rekisterillä, eli mekanismilla 2 (M2). Ihmisen tavallinen puheääni käyttää äänen aikaansaamiseksi mekanismia 1 (M1). Rintaäänien kohdalla puhutaan joskus siitä, että kaikki, mikä resonoi rinnassa, on rintaäänirekisterissä (M1) tuotettua ääntä. Värähtelyn tuntemus on kuitenkin huono mittaväline rekisterijaottelussa, ja tämän takia tarkemmat määritelmät ovat tarpeen.

Jotkut laulunopettajat käyttävät vielä termiä mixed voice/middle voice/voice mixte kuvaamaan jotain rekisteriä nk. rintaäänien ja falsetin välillä. Tällä tarkoitetaan laulajien tapaa peittää rekisterivaihdokset laulussaan niin, että äänen havaitaan jatkuvan yhtenäisenä äänialan läpi. Sen tarkoitus on simuloida toisen mekanismin äänen laatua, kun käytetään toista mekanismia (M2 kun M1:ssä, M1 kun M2:ssa) Mixed voice ei kuitenkaan ole oma rekisterinsä, vaan haluttu efekti tuotetaan joko M1 tai M2 mekanismilla. Miehet tuottavat helposti mixed voicea M1 mekanismilla ja naiset M2 mekanismilla, mutta esimerkkejä on löytynyt myös sopraanon tuottamasta mixed voicesta M1 mekanismilla ja kontratenorin mixed voicesta sekä M1 että M2 mekanismilla (Castellengo, M., Chuberre, B., Henrich, N., (2004), 3-4).

2.6 Äänen synnyn teoriat

Kuten lauluäänien rekisterien kohdalla, on äänen synnyn kuvaamisestakin esitetty erilaisia teorioita. On esiintynyt eroavia näkemyksiä siitä, miten ääni alun perin syntyy äänihuulissa ja mikä on ääntöväylän tehtävä vokaalien muodostuksessa. Seuraavaksi käydään läpi kaksi tunnettua äänen synnyn teoriaa: nk. source-filter -teoria ja transient-teoria. Tarkastellaan myös eri näkemyksiä äänihuulten äänentuotossa.

Äänen syntymisen teorioista ensimmäisiä oli Robert Willisin nimiin luettu niin kutsuttu transient-teoria, josta Willis kiinnostui ihmisäänien ja urkujen samankaltaisuuden takia. Willis puhuu lehdykällisistä pilleistä, joita käytetään muun muassa joissain kirkoissa esiintyvissä suurissa pilliuruissa. Lehdykällisissä urun putkissa ääni saadaan aikaiseksi värähtelevän lehdykän avulla, joka on verrattavissa ihmisen kurkunpäässä sijaitseviin värähteleviin äänihuuliin. Tämän jälkeen ääntä muokataan lehdykässä kiinni olevassa urun pillissä, aivan kuten ihmisen suun ja nenän onteloissa (Willis, R., (1829), 235).

Willisin teorian mukaan vokaaliäänteet koostuvat äänihuulten aiheuttamista heikkenevistä akustisista aalloista (Chen, C. J. (2016), 4).

Samoihin aikoihin Willisin teorian kanssa kilpaili Wheatstonen ja Helmholtzin ehdottama overtone-resonance/source-filter/harmonic -teoria. Tämä teoria oletti, että äänihuulten värähtely on jaksollista taajuudella f_0 , ja että sitä voitaisiin kuvata Fourier-muunnoksen avulla, joka koostuu perustaajuudesta ja yläsävelistä, jotka ovat perustaajuuden kerrannaisia. Ääntöväylää käsitellään tässä teoriassa Helmholtzin resonaattorina, jolla on resonanssitaajuuudet F_1 , F_2 , F_3 jne., joita kutsutaan formanttitaajuuksiksi (Chen, C. J. (2016), 5).

Ääni suodattaa ihmisen ääntöväylässä sen formanttien määräämiltä taajuuksilta. Akustisen energian keskittyminen näihin kahteen formanttialueeseen eliminoi kaikki muut paitsi oleelliset harmoniset osäänekset näiden kahden taajuusalueen läheisyydestä (Titze, I. R. (1994), 148).

Yhä esiintyy kiistelyä siitä, kumpi teorioista kuvaa paremmin vokaalien tuottoa. Chenin (2016) mukaan:

Overtone-resonance teoria olettaa ihmisen äänihuulten värähtelyn olevan jaksollista. Todellisuudessa on kuitenkin hyvin monia tekijöitä, jotka vaikuttavat äänihuulten avautumisen ja sulkeutumisen jaksonaikaan, kuten jitter (taajuusepävakaumus), shimmer (amplitudiepävakaumus) ja vibrato. Normaalin keskustelun aikana äänen sävelkorkeus vaihtelee usein myös huomattavasti, joka viittaa äänihuulten avautumisten ja sulkeutumisten taajuuden suuriin ja nopeisiin muutoksiin. Vokaalit pystytään myös hahmottamaan yksittäisten äänihuulten sulkeutumisten kautta ilman jaksollista värähtelyä. Toisaalta transient-teoria toimii sovellettuna myös jaksollisiin värähtelyihin, mutta overtone-resonance -teoria ei niinkään epäjaksollisiin värähtelyihin. Tämä osoittaa transient-teorian olevan näistä kahdesta parempi teoria. Tätä näkemystä tukee myös Chenin mukaan se, että narinarekisterillä (M_0) muodostetut vokaalit ovat yhä täysin havaittavissa ja tunnistettavissa. Tämä osoittaa, että yksittäinen äänihuulten sulkeutumisen aiheuttama heikkenevä akustinen aalto sisältää riittävästi informaatiota vokaalin äänenväristä. Transient-teorian näkökulmasta tällaiset ilmiöt ovat osa ihmisen ääntä ja niitä voidaan käsitellä luonnollisesti ja suoraviivaisesti (Chen, C. J. (2016), 5-6).

Fletcherin (1929) mukaan teorioilla on kuitenkin vain erilaiset näkökulmat ja tavat kuvata samaa mekanismia:

Fletcherin mukaan ihmisen kurkku tuottaa oletettavasti aina suhteellisen jaksollisia ilmapurkauksia johtuen äänihuulten elastisista ominaisuuksista ja resonoivista ilmapatsaista niiden molemmiin puolin. Tämä on havaittu todeksi kokeellisessa tutkimuksessa, ja on huomattu myös, että eri aallot seuraavat toisiaan melko säännöllisesti. Toisaalta sama tutkimus tukee myös sitä näkemystä, että säännölliset

ilmapurkaukset synnyttävät suun onteloiden transientit, koska amplitudit ovat suuria alussa ja asteittain vähenevät loppua kohden. Kun sävelkorkeus on suuri, luonnollisilla värähtelyillä ei ole aikaa vaimentua kokonaan ennen kuin toinen ilmapulssi synnyttää ne uudestaan. On selvää, että molemmissa teorioissa vokaalin laatu riippuu ääntöväylän ominaistajuuksista ja vaimennuksesta. Näiden kahden teorian ero ei ole käsityksessä siinä, mitä tapahtuu, kun vokaaleja tuotetaan, vaan tavassa, jolla esitetään nämä liikkeet fysikaalisesti. (Fletcher, H., D., (1929), 48-49)

2.6.1 Yhteenvetoa

Harmonic/overtone-resonance/source-filter theory:

Äänihuulet luovat kompleksisen aallon, jossa on perustaajuus ja suuri määrä harmonisia osaaääneksiä. Komponenttitaajuudet ovat kaikki kerrannaisia perustaajuudesta. Kun nämä aallot kulkevat kurkun, suun ja nenäonteloiden läpi, ne taajuudet, jotka ovat lähellä näiden onteloiden resonanssitaajuuksia voimistuvat. Nämä voimistuneet taajuusalueet määräävät vokaalin luonteen.

Inharmonic/transient theory:

Fletcherin mukaan: Äänihuulet toimivat vain vaikuttajina/välittäjinä, jotka synnyttävät transienttitaajuudet, jotka ovat äänionteloille ominaisia. Ilmapurkaus ääniraosta laittaa ilman näissä onteloissa liikkeeseen. Tämä värähtely lakkaa pian, kunnes taas seuraava ilmapurkaus aloittaa sen uudestaan. Nämä purkaukset eivät välttämättä seuraa toisiaan jaksollisesti (Fletcher, H., D., (1929), 47-48). Koska ääni syntyy äänihuulten sulkeutuessa, on hieman virheellistä ajatella ilman purkautumisen aiheuttavan äänen, vaikka se äänen tuottoon liittyykin olennaisesti.

Lyhyt tiivistelmä ihmisäänen fysiikasta

1. Jokainen yksittäinen summa-aallon osa syntyy ääniraon sulkeutumishetkellä.
2. Ääniraon sulkeutuminen on äkillinen ja voimakas.
3. Äänisignaali on voimakas suljetussa vaiheessa.
4. Ääniraon aukeaminen on hidas, heikko ja ajoittain äänekäs.
5. Äänisignaali on heikko avonaisessa vaiheessa.
6. Äänisignaalin korkeataajuiset komponentit (1 kHz to 4 kHz) keskittyvät suljetun vaiheen alkuun ja nämä vaimenevat nopeammin.
7. Äänisignaalin matalataajuiset komponentit (<1 kHz) vaimenevat hitaammin ja dominoivat jokaisen yksittäisen aallon myöhempää osaa.
8. Pitkä ääniraon suljetun vaiheen aika liittyy suureen äänen intensiteettiin
9. Lyhyt ääniraon suljetun vaiheen määrä liittyy pieneen äänen intensiteettiin

10. Ääniraon alapuolinen paine kasvaa maksimiinsa ääniraon sulkeutumishetkillä

11. Ääniraon yläpuolinen paine putoaa minimiinsä ääniraon avautumishetkillä.

(Chen, C. J. (2016), 79-80, muokattu)

3. Äänen opettaminen

Tässä luvussa tarkastellaan äänen opetukseen liittyviä teorioita. Aluksi määritellään oppiminen ja tarkastellaan oppimiseen liittyviä teorioita, kuten motivaation vaikutusta oppimiseen. Katsotaan myös erilaisia oppimiskäsityksiä.

3.1 Oppiminen tutkimuskohteena

Oppimiseen liittyy tietomäärän ja kyseisen aiheen ymmärtämisen ja hahmottamisen muutoksia ja oivalluksia. Oppimisen aikana yksilön on myös mahdollista muuttaa käyttäytymistään tietyssä tilanteessa (Taber, K., S., (2009), 8). Toisin sanoen, kun ihminen oppii uutta, hän pystyy reagoimaan oppimansa tiedon avulla tilanteisiin eri tavoin, kuin ennen opitun tiedon omaksumista.

Tutkimusta oppimisesta tehdään, jotta opetukseen saataisiin uutta tietoa ja opetusta voitaisiin kehittää perustellusti. Tutkimustiedon avulla on mahdollista tunnistaa ja sitä myötä välttää huonosti toimivia ”väärä” opetusmetodeja.

Tutkimuksista saadun tiedon avulla voidaan valita opetettavia asiasisältöjä ja suunnitella niiden sijoittamista oppitunneille parhaan oppimistuloksen aikaansaamiseksi.

Hyvää opetusta tutkii myös opetuksen teoria didaktiikka. Didaktinen fysiikka soveltaa fysiikassa käytettyjen käsitteiden rakenteita ja niiden kehittämistä opetuksen suunnittelussa, suorittamisessa ja parantamisessa. Tarkoituksena on kehittää opetusta ja oppimista siihen suuntaan, että niissä tulisi enemmän esille fysiikalle ominaisia piirteitä (Koponen, I., 2014), 10).

3.1.1 Konstruktivistisen oppimisen malli

Konstruktivistinen oppimiskäsitys korostaa joustavaa ja oppijan valmiuksia kehittävää opetusta ja painottaa oppimisprosessin sisäistä säätelyä (Rauste-Von Wright, M., Von Wright, J., Soini, T., (2003), 141). Opetussuunnitelmien tulisi olla joustavia ja ottaa huomioon niin oppijan valmiudet kuin tiedon suhteellisuus ja muuttuvuuskin (Rauste-Von Wright, M., Von Wright, J., Soini, T., (2003), 162-176).

3.1.2 Konstruktivistinen oppiminen korostaa oppilaan omaa aktiivisuutta

Konstruktivismin mukaan tieto on aina yksilön tai yhteisön itse rakentamaa. Oppiminen vaatii oppijan aktiivista toimintaa, eikä pelkkä tiedon passiivinen vastaanottaminen johda oppimiseen (Tynjälä, P., (1999), 37-38). Konstruktivistinen oppimiskäsitys korostaa oppijan aktiivisuutta ja opettajajohtoisen opetuksen muuttumista, eli että oppilaat olisivat aktiivisemmin mukana opetuksessa, eikä enää työskenneltäisi ainoastaan luentotyylisen opetuksen mukaan. Opetuksessa oppilaita ei pitäisi kohdella tyhjinä tauluina, joihin voi ”kaataa” tietoa. Oppijoita kehoitetaan myös parantamaan omia metakognitiivisia taitojaan, jotta itseohjautuvuus lisääntyisi.

Etenkin fysiikan opetuksen näkökulmasta konstruktivistiseen oppimiskäsitykseen mukaan pohjautuva opiskelu toimii hyvin, koska tällöin fysikaalisten ilmiöiden ymmärtäminen kokonaisuutena korostuu ulkoa oppimiseen verrattuna. Opetettavia asioita ei kannatta opetella ulkoa irrallisesti, vaan nekin olisi hyvä omaksua joidenkin reaali maailman ilmiöiden ja ongelmien kautta, johonkin tilanteeseen tai tapahtumaan liittyvänä. Oppiminen nähdäänkin tilannesidonnaisena, jolloin juuri arkiesimerkit ja oppipoikamainen opetustapa auttavat oppimisen kehityksessä. Opetuksessa on otettava huomioon myös oppilaiden mahdolliset erilaiset tulkinnat, ja että kaikki eivät opi samoja asioita samoista materiaaleista ja esimerkeistä. Opetettavat asiat on myös hyvä esittää erilaisissa konteksteissa, jotta oppilaiden tietorakenteisiin syntyisi monia eri kytkentöjä opiskelluista asioista. Sosiaalisen vuorovaikutuksen osa oppimisessa on konstruktivismiin tärkeitä seurauksia. Uusia arviointimenetelmiäkin voidaan kehittää, kun oppimista tarkastellaan jatkuvana tiedon rakentamisen prosessina, eikä pelkkänä mieleen palauttamisen taitona. Konstruktivistisen oppimiskäsityksen mukaan on myös hyvä käsitellä sitä, miten tieto on muodostunut, ja kuinka suhteellista se voi olla eri oppiaineissa. On hyvä käydä läpi vaiheita, joiden kautta oppiaineiden tieto on joskus tuotettu, jotta oppilaille ei syntyisi vaikkapa sellaista kuvaa, että kaikki tieto on syntynyt siinä järjestyksessä, kuin missä se on kirjassa esitetty. Lopuksi vielä opetussuunnitelmaa voi aina kehittää paremmin siihen suuntaan, että se ottaa huomioon konstruktivistisen oppimiskäsityksen tutkimukset ja suuntaa opetusta ongelmakeskeiseksi ja käsittelemään ilmiöitä suurina kokonaisuuksina (Tynjälä, P., (1999), 61-67).

3.1.3 Fysiikan opettamisen problematiikkaa

Fysiikan opetusta kouluympäristössä on tutkittu mm. tarkastelemalla erilaisia opetusmetodeja ja oppilaiden yleistä kiinnostusta opetettavia aiheita, sekä fysiikkaa yleisemmin, kohtaan. Tutkimusten tavoitteena on tuoda esille tapoja ja työkaluja, joilla kehittää opetusta ja tapahtuvaa oppimista. Fysiikka eroaa esimerkiksi humanistisista aineista, kuten vaikkapa historiasta tai äidinkielestä ja tämä fysiikan tieteelle ominainen laatu asettaa omia haasteita asian opettamiseen kouluissa. Fysiikan oppiminen vaatii monien ilmiöiden ymmärtämistä jopa abstraktilla tasolla ja usein suhteellisen haastavan matematiikan käyttöä. Tämä yhdistelmä ei tee aineesta kaikkein helpointa tai suosituinta, joten fysiikan opetuksessa on otettava nämä huomioon, jos halutaan saada motivoituneita opiskelijoita ja päästä haluttuihin tavoitteisiin suurilla ihmisryhmillä luokkahuoneissa. Seuraavassa tarkastellaan joitakin tekijöitä, jotka tulevat esille erityisesti fysiikan opetuksessa kouluissa.

Jo fysiikan opetuksessa tulisi tulla esille fysiikan tieteenalan ominaispiirteitä. Olisi hyvä, jos jo koulussa tutustuttaisiin fysiikan tietoon koskeviin filosofisiin kysymyksiin, tiedon luonteeseen fysiikassa ja siihen, miten käsitteellinen tieto rakentuu (Koponen, I., 2014), 9).

Fysiikan opetuksella on kouluissa monia haasteita. Yksi niistä on fysiikan alhainen suosio. Oppilaiden suhtautuminen fysiikan opetukseen vaikuttaisi ainakin osittain olevan sukupuolisidonnaista. Etenkin vauraammissa maissa tyttöjen kohdalla fysiikan suosio on alhainen (Sjøberg, S., Schreiner, C., 2010, 12). Tytöt kokevat fysiikan opiskelemisen erityisen epäkiinnostavaksi. Eroja löytyy myös siinä, miten eri sukupuolet käsittävät fysiikan ymmärtämisen. Siinä missä keskimäärin pojat hyväksyvät sen, että fysiikka on usein abstraktia, idealisoitua ja ehkä jopa epäkäsittelistä, kokevat tytöt, että kokonaista ymmärtämystä asiasta ei ole syntynyt ennen kuin sen voi liittää laajempaan kontekstiin. Tyttöjen ymmärrys sijoittuu maailman ja fysiikan systeemien välimaastoon ja he yrittävät ymmärtää näiden systeemien suhteet todelliseen maailmaan (Stadler, H., Duit, R., Benke, G., (2000), 4).

Jotkin fysiikan sisältämät käsitteet ja ilmiöt ovat myös monille oppilaille arkijärjen vastaisia. Oppilaiden, etenkin tyttöoppilaiden, mielestä fysiikka on epäintuitiivista ja abstraktia ja sen opiskelu on vaikeaa (Duit, R., Schecker, H., Höttecke, D., Niedderer, H. (2014), 434). Myös oppilaiden omat ennakkokäsitykset fysikaalisista ilmiöistä sotivat asioiden todellista fysikaalista luonnetta vastaan. Monilla oppilailla on ilmiöistä sellaisia näkemyksiä, jotka eivät ole yhteensopivia fysiikan näkemysten kanssa. (Wandersee, J., H., Mintzes, J., J., Novak, J., D., (1994), 181-183).

Nämä kaikki epäkohdat olisi hyvä korjata ja tämä onkin yksi syy, miksi fysiikan opetusta tutkitaan ja jatkuvasti kehitetään. Luonnontieteen opettamisen tutkimus perustaa pohjaansa suurelta osin muihin tieteisiin, kuten tieteenfilosofiaan, kognitiiviseen psykologiaan ja tieteen opettamiseen. Siihen vaikuttavat myös koko ajan argumentit siitä, mitä pitäisi tai ei pitäisi laskea tieteelliseksi tiedoksi. Luonnontieteen oppimisen tutkimuksen voi ajatella keskittyvän tieteen opettamiseen ja oppimiseen (Taber, K., S., (2009), 17).

Fysiikan opettamista tutkivaa alaa kutsutaan nimellä "Physics education research" tai lyhyemmin "PER". Fysiikan opetuksen tutkiminen liittyy läheisesti didaktiseen fysiikkaan, sillä molemmat koettavat kehittää ja parantaa opetuksellisia näkökulmia. Fysiikan opetuksen tutkimus eroaa didaktisesta fysiikasta kuitenkin siten, että edellinen ei pyri ymmärtämään fysiikan tietorakenteiden ja käsitteenmuodostuksen syvempää luonnetta (Koponen, I., 2014), 11).

Fysiikan filosofia ja fysiikan historia auttavat määrittelemään fysiikan tieteen luonnetta tarjoamalla viitekehyksen tähän. Nämä alat liittyvät siihen, mikä tekee juuri fysiikan opettamisesta ja oppimisesta erityistä. Näiden lisäksi välttämättömiä referenssialoja ovat myös sosiaaliset tieteet kuten pedagogia ja psykologia (Duit, R., Schecker, H., Höttecke, D., Niedderer, H. (2014), 434-435).

Johonkin tiettyyn opetettavaan asiaan liittyvää fysiikan sisältöä ei voi sellaisenaan siirtää opetukseen. Jotta tämä siirtymä saataisiin tehtyä, on tieteen sisältörakenne yksinkertaistettava ja asetettava mielekkäisiin konteksteihin, jotta sisältö olisi

järkeenkäypää opiskelijoita silmällä pitäen. Tämän jälkeen näistä yksinkertaistetuista alkeisideoista rakennetaan järkevä opetuksen sisältö rakenne (Duit, Gropengießer, Kattmann, Komorek & Parchmann, (2012), 21).

Valmiin fysikaalisen tiedon opettamisessa on aina omat ongelmansa. Oppilas ei välttämättä ymmärrä automaattisesti, että oppikirjoissa tarjotut fysikaaliset teoriat ja lauseet ovat vaatineet pitkällisiä prosesseja ennen kuin ne on muotoiltu kouluissa opetettaviin muotoihin. Oppilas voi kokea suuren määrän objektiivisesti hyväksyttyä tietoa vaikeaksi sisäistää ja opetus kokee myös haasteita näissä tapauksissa. Koponen mainitsee ainakin kaksi väärää lähestymistapaa tähän ongelmaan. Ensimmäisenä hän mainitsee opettajavetoisen tiedon siirtämisen mallin, joka käsittelee oppilaita vain tiedon vastaanottajina ja omaksujina. Tällöin oppilaalle korostuu ainoastaan haluttu staattisen tiedon rakenne, eikä lähestymistavassa tuoda esille argumentointiprosesseja ja perusteluja, jotka tähän tilanteeseen johtavat. Toisena vääränä tapana mainitaan taas vastakkainen tapahtuma, jossa korostuu taas liikaa argumentaatiovaiheita, eikä ota huomioon halutun opetetun tiedon päämäärää. Täytyy siis muistaa, että jotta oppimisesta saataisiin motivoivampaa ja siitä aiheutuisi syvempää ymmärrystä, on tuettava oppilaiden käsitteidenmuodostusta ottamalla opetuksessa huomioon prosessit, kuitenkin lopullista päämäärää unohtamatta (Koponen, I., 2014), 19).

Tutkimusten mukaan oppilaiden kannustamisella opiskeluun on opiskelua edistäviä vaikutuksia. Positiiviset tunteet ja kokemukset tuottavat parempia tuloksia kouluissa (Laukenmann, M., Bleicher, M., Fuß, S., Gläser-Zikuda, M., Mayring, P., von Rhöneck, C., (2003), 14). Myöskään käsitteidenmuodostusta ei tapahdu pelkästään käyttämällä kognitiota. Uuden käsitteen ymmärtämiseen liittyvään kognitiiviseen prosessointiin kuuluvat ainakin osittain motivaatioon liittyvät tekijät. (Pintrich, P., R., Marx, R., W., Boyle, R., A., (1993), 26).

Oppilastyöt.

Laboratoriotöiden avulla on tarkoitus opetella ja oppia tiedon ja mittaamalla tuotetun aineiston keräämistä, aineiston tulkintaa, tarkoituksenmukaisten kysymysten asettamista, johtopäätösten tekemistä sekä myös laboratoriokokeiden ja havaintojen merkityksen tunnistamista tieteellisten teorioiden kehittämisessä. Kaikki nämä tavoitteet eivät välttämättä toteudu perinteisessä opetuslaboratoriotyöskentelyssä. On toki selvää, että opetuslaboratoriossa työskentelyssä ei pystytä täysin jäljittelemään fysiikan tieteen todellisia työskentelytapoja ja olosuhteita, ja eroja löytyy sekä tehtävissä kokeissa, niiden suunnittelussa ja käytettävässä laitteistossa, tehtävien kokeiden päämäärissä ja käytössä olevissa resursseissa (Koponen, I., 2014), 21-22). Kokeellisuus fysiikan opetuksessa auttaa opiskelijoita hahmottamaan käsitteitä ja ymmärtämään niiden merkityksiä. Kokeellisuudella on oltava perusteltu rooli osana opetusta (Koponen, I., 2014), 21). Laboratoriotöiden tiukkaa ohjeistusta on kritisoitu

siitä, että ne muistuttavat keittokirjoja resepteineen (Clough, M., P., (2006) 467; Hofstein, A., Kind, P., M., (2012), 197). Kädestä pitäen ohjatut laboratoriotyöt eivät vaadi oppilaalta ymmärrystä niistä fysiikan periaatteista mihin suoritettavat kokeet perustuvat tai aina edes työn tarkoituksesta. Konstruktivistisen opetuksen teorioiden perusteella keittokirjamaiset laboratoriotyöt ovat ennemminkin passiivista oppimista, kuin aktiivista, sillä oppimista tapahtuu, kun oppijat osallistuvat aktiivisesti tiedon ja merkityksen rakentamisen prosessiin (Tynjälä, P., (1999), s. 38).

Tavoitteet ja standardit.

Fysiikan opetuksen yleiset tavoitteet on opetussuunnitelmassa jaettu kolmeen osioon: merkitys, arvot ja asenteet; tutkimisen taidot ja fysiikan tiedot ja niiden käyttäminen. Käydään nämä läpi perusopetuksen ja lukion osalta.

Perusopetus. (OPS, 2014)

Merkitys, arvot ja asenteet

Perusopetuksessa oppilaita innostetaan fysiikan opiskeluun, ohjataan itsenäiseen työskentelyyn, ymmärtämään fysiikan merkitystä omassa elämässä sekä käyttämään oppimaansa elämässä kestävän kehityksen mukaisesti

Tutkimisen taidot

Oppilaita opetetaan tekemään kysymyksiä, tekemään kokeellisia töitä turvallisesti ja johdonmukaisesti sekä ymmärtämään töiden tuloksia. Myös teknologian käytön tärkeyttä tuodaan esiin ja opetetaan käyttämään sitä tiedonhakuun ja tutkimisen sekä oppimisen apuvälineenä.

Fysiikan tiedot ja niiden käyttäminen

Opetuksen tehtävä on myös saada oppilaat ymmärtämään ja käyttämään fysiikan kieltä ja muokata oppilaiden käsitystä maailmasta fysiikan tieteen mukaiseksi. Oppilaiden tulee osata käyttää malleja apunaan ja arvioida lukemaansa kriittisesti sekä ilmaista itseään loogisesti fysiikan tietojen avulla. Opetus antaa myös riittävät valmiudet jatko-opintoja silmällä pitäen ja antaa mahdollisuuden tutustua tapoihin soveltaa fysiikkaa eri tilanteissa.

Lukio. (LOPS, 2019)

Merkitys, arvot ja asenteet

Lukion opetussuunnitelman tavoitteena on, että oppilas ymmärtäisi fysiikan merkityksen maailmassa, tunnistaa oman osaamisen tasonsa ja pystyy itseohjautuvasti halutessaan asettamaan ja saavuttamaan tavoitteita oppiaineessa. Oppilas ymmärtää tapoja soveltaa fysiikkaa eri tilanteissa ja saa omakohtaisesti mahdollisuuden tutustua

vierailujen muodossa fysiikan soveltamiskohteisiin. Opiskelijalla on myös lukiokurssien jälkeen valmiudet jatko-opintoihin.

Tutkimisen taidot

Tavoitteena on, että opiskelija ymmärtää, miten fysiikan tieto muodostuu ja miten uutta tietoa luodaan. Oppilas osaa muodostaa kysymyksiä järkevästi tutkimusten lähtökohdiksi ja osaa toteuttaa tutkimuksia ja fysiikan töitä. Oppilas ymmärtää mitkä asiat voivat aiheuttaa virheitä mittauksissa ja ymmärtää saadut tulokset ja pystyy esittämään ne muille ihmisille.

Fysiikan tiedot ja niiden käyttäminen

Opiskelija osaa käyttää fysiikan termejä johdonmukaisesti ja pystyy käyttämään niitä ilmaisemaan johtopäätöksiään ja omia näkökulmiaan ja ymmärtää, miten tapahtumat noudattavat fysiikan lakeja luonnossa ja miten fysiikka mahdollistaa teknologisia sovelluksia. Opiskelija ymmärtää mallien merkityksen ja voi käyttää niitä kuvaamaan eri tilanteita. Opiskelija osaa myös käyttää ohjelmia mallinnuksen ja tulosten ilmaisemisen välineenä sekä arvioida tietoa ja omia johtopäätöksiään kriittisesti.

Sisältö, prosessit ja näkemykset tieteen luonteesta. Opettajat eivät välttämättä kiinnitä huomiota fysiikan tieteen luonteeseen eivätkä ole miettineet sitä, mikä on matematiikan rooli fysiikassa (Mulhall, P., Gunstone, R., (2007), 456).

Sekä opettajilla, että oppilailla on molemmilla riittämättömät tiedot fysiikan luonteesta. Tähän pitäisi kiinnittää huomiota ja auttaa opettajia saavuttamaan prosessitaitoja, ymmärrystä tiedonmuodostuksesta fysiikassa ja riittävät käsitykset tieteen luonteesta (Duit, R., Schecker, H., Höttecke, D., Niedderer, H. (2014), 451).

3.1.8 Motivaation kasvattaminen kokemuseräisen äänikurssin avulla

Äänikurssi on nykyisessä opetussuunnitelmassa lukion viides kurssi (FY05). On mahdollista, että tässä vaiheessa fysiikkaa opiskelevat sellaiset oppilaat, jotka eivät ole vielä päättäneet, miten laajasti he jatkossa tulevat tarvitsemaan fysiikan tietoja: opiskelevatko he fysiikkaa esimerkiksi lääketieteellisen pääsykokeita varten, vai siksi että ovat kiinnostuneet opetettavasta aineesta, vai jostakin muusta syystä. Äänikurssi on aiheena sellainen, että se tarjoaa monia mahdollisuuksia oppilaiden innostamiseen jatko-opintoihin. Vähäisten esitietovaatimusten takia kurssi soveltuisi myös erillisenä kurssina myös sellaisille oppilaille, joita ääni (usein laulun, musiikin harrastuksen ja kuuntelun kautta) vain kiinnostaa enemmän.

Koska osa oppilaista pitää fysiikkaa tarpeettomana oppiaineena, olisi hyvä, jos fysiikan opetusta saataisiin sidottua johonkin kaikkia oppilaita kiinnostavaan aihepiiriin. Usein juuri tytöt kokevat fysiikan opiskelut heille turhaksi. Erään tutkimuksen mukaan laulaminen on suurimman osan oppilaista mielestä mielekästä toimintaa riippumatta sukupuolesta (Mizener, C., P., (1993), 236). Toisessa tutkimuksessa suurin osa

oppilaista koki tieteen opiskelun musiikin kautta kiinnostavaksi, kun taas tiedeopintoja muuten pidettiin epämiellyttävinä (Hoffman, G., L., Jouny, I., (1996), 1304, 1306). Näin voisi päätellä lauluäänen fysiikan tarkastelemisen olevan kiinnostavampaa, kuin vaikkapa jousi-punnus -systeemin tarkasteleminen.

Todennäköisesti laulun ja laulamisen fysiikan opetukseen ja äänen tuottamiseen liittyvien ilmiöiden lähestyminen motivoivan vuorovaikutteisen projektin muodossa edistäisi fysiikan oppimista ja kasvattaisi mielenkiintoa ainetta kohtaan. Kohdatessaan omaan mielenkiinnon kohteeseensa osuvaa sisältöä kouluaineissa, oppilailla on suurempi todennäköisyys työskennellä sisäisen motivaation johdattamana.

3.1.4 Oppiaineintegrointi

Musiikki ja fysiikka tarjoavat monia asioita, joiden pohjalta voitaisiin toteuttaa aineiden välistä oppiaineintegrointia, tässä tutkielmassa on esitetty vain osa niistä ja jätetty vaikkapa äänenvoimakkuus ja huojuunta tutkielman ulkopuolelle. Lähes joka koulussa on myös välineet, jotka mahdollistavat ääni-ilmiöiden fysikaalisen tutkimuksen helposti. Myös opetussuunnitelma kannustaa oppiaineiden rajat ylittävään opetukseen. OPS ei kuitenkaan ehdota mitään tiettyä tapaa yhdistää näitä aineita, vaikka sellaiseen on monta mahdollisuutta. Musiikkia on luontevaa tutkia myös fysiikan kannalta, vaikka fysiikkaa ei musiikin tunneilla välttämättä käsitellä.

3.2 Toteutetun tutkimuksen tavoitteet ja tarkennetut tutkimuskysymykset

Tutkimuksen tarkoitus on tarkastella erilaisiaharjaantuneiden ja harjaantumattomien laulajien tuottamia vokaaliäänteitä käyttämällä LoggerPro-ohjelmaa. Työssä selvitetään, havaitaanko laulajien äänistä vokaaleille ominaisia formantteja ja nähdäänkö tämän lisäksi esimerkiksi ammattilaislaulajilla laulajan formanttia. Tutkitaan myös, vaikuttavatko twang ja sävelkorkeudeton ääni (esim. kuiskaus) siihen, miten selvästi formanttialueet erottuvat. Näiden tulosten pohjalta suunnitellaan opetustuokio, jonka tarkoituksena on opettaa lukion äänen fysiikkaa kiinnostavassa asiayhteydessä oppilaslähtöisesti. Tarkoitus on tuottaa luokkahuoneessa koejärjestely, jolla saadaan näkyviin äänistä eri vokaaleille kuuluvat formantit. Teoriassa keskitytään ensin ilmiön fysiikan kuvaamiseen ja sen jälkeen pedagogisiin teorioihin ja perustellaan, miksi tällainen opetuskokeilu olisi hyvä lisä opetukseen.

4. Laulajien äänen tutkiminen

4.1 Koejärjestely

Kokeen tarkoituksena on tutkia laulettujen vokaalien spektriä LoggerPro:n avulla. Jotta saataisiin tutkittua, esiintyvätkö vokaalien ominaisuudet samankaltaisesti sukupuolesta riippumatta, koostuu koehenkilöryhmä neljästä miehestä ja kolmesta naisesta. Sekä nais- että miesryhmässä tutkimushenkilössä oli yksi laulun ammattilainen (laulunopettaja), yksi harrastelijalaulaja tai laulunopiskelija, sekä yksi maallikko, jolla oli vähän tai ei ollenkaan kokemusta laulusta, eikä koulutusta alalta. Miesten tapauksessa oli kaksi maallikkoa. Kokeet suoritettiin pyytämällä koehenkilöitä laulamaan tietyt vokaalit käyttäen erilaisia äänentuottotapoja. Tutkittavat vokaalit valittiin niin, että niihin kuuluisi mahdollisimman erilaisilla nielun konfiguraatioilla tuotettuja vokaaleita (tutkitaan ns. italialaiset vokaalit (a, e, i, o, u)). Esimerkiksi [a] ja [i] -vokaalit eroavat hyvin paljon näiltä kurkun asetuksilta. Valitut vokaalit olivat siten [a], [e], [i] [o] sekä [u].

Koe suoritettiin pop & jazz konservatorion tiloissa Hämeentiellä laululuokissa. Koetta varten valmisteltiin kahden mikrofonin yhdistelmä, jonka tarkoituksena oli tallettaa ääni sekä LoggerProhon Vernierin oman laitteiston kautta, sekä wav. muodossa Audacityyn mahdollista myöhempää analyysiä varten. LoggerPro ei pysty lukemaan tietokoneelle tallennettua ääntä eikä myöskään palauttamaan lukemaansa ääntä aaltomuotoon kuuntelua varten, joten on varmuuden vuoksi hyvä tallettaa kaikki äänet myös äänitysohjelmaan. Kokeessa käytettiin opetuskäyttöön suunniteltua Vernierin mikrofonia (MCA-BTA), jonka taajuusalue oli noin 100Hz-15kHz. Tämä mikrofoni yhdistettiin LabQuest Mini liitäntäyksikköön, joka yhdistettiin tietokoneen USB-porttiin. LabQuest Mini:n avulla voitiin mikrofonia käyttää LoggerPro-mittausohjelmassa mittaamaan äänenpainetta ja taajuutta. Toisena mikrofona käytettiin SHURE BG 4.1 kondensaattorimikrofonia, jonka yleisiin käyttökohteisiin kuuluu mm. kitaran ja muiden kielisoitinten, rumpujen sekä laulun äänittäminen (Shure Brothers Incorporated, (1998)). Tämän mikrofonin taajuusvaste oli noin 40Hz-18kHz. SHURE -mikrofoni yhdistettiin XLR-kaapelia käyttämällä Audient iD4 ulkoiseen äänikorttiin, joka taas yhdistettiin tietokoneen USB-porttiin. Tämän mikrofonin äänet taltioitiin käyttämällä Audacity-ohjelmaa. Molemmat mikrofonit asetettiin vierekkäin mikrofonitelineeseen ja laulajien äänet äänitettiin noin 15 cm päästä mikrofoneista, jotta välttyttäisiin SHURE:n lähiäänivaikutukselta (proximity effect). Lähiäänivaikutus tarkoittaa sitä, että tietyillä suuntakuvioilla varustetut mikrofonit lisäävät taajuusvastetta matalilla taajuuksilla, kun mikrofoni viedään lähelle äänilähdettä. Hertta- ja kahdeksikkokuvioisilla mikrofoneilla on vahva lähiäänivaikutus, kun taas pallokuvioisilla ei ole sitä lainkaan (Neumann). Mikrofonien lisäksi kokeiltiin mobiilisovellusta, jossa voidaan tulkita spektrejä.

Tutkimuksessa haluttiin tarkastella vokaalien spektrejä, kun ne tuotetaan kahdella yleisimmällä laulettaessa käytetyllä kurkunpään mekanismilla, M1:llä ja M2:lla.

Koehenkilöiden oli tarkoitus tuottaa molemmilla mekanismeilla tutkittava lause eri sävelkorkeuksilla. Koska mukana oli kokemattomia laulajia, päätettiin sävelkorkeudeksi valita miehillä G3 (196 Hz), kun käytettiin M1-mekanismia ja korkeampi A4 (440 Hz), kun käytettiin M2-mekanismia. Miehillä M1-mekanismilla tuotettu ääni voi alkaa kuulostaa rasittuneelta jo C4 (261,63 Hz) sävelkorkeudella, joten valittiin hieman alempi sävelkorkeus, jotta saataisiin tasaisemmat ja puhtaammat nuotit.

Naisryhmässä toimittiin vastaavasti, mutta korkeammilla sävelillä, sillä naisilla on luonnostaan keskimäärin korkeamman taajuuden ääni, kuin miehillä. Naisten kohdalla tutkittiin sävelkorkeutta D4 (293,66) kun käytettiin M1-mekanismia ja sävelkorkeutta C5 (659,25 Hz), kun käytettiin mekanismia M2. M2-mekanismilla tuotetuissa äänissä halutaan tarkastella myös eroja vuotoisen ja ”kiinteän” äänen välillä. Kokeita tehtäessä huomattiin kuitenkin, että laulullisesti kokemattomampien koehenkilöiden kohdalla kyky tuottaa tietyn korkuista ääntä vaihteli paljon. Tämä johti siihen, että tällaisten henkilöiden kohdalla jouduttiin antamaan koehenkilöiden itse valita laulukorkeus, eikä edellä mainittuja valittuja sävelkorkeuksia pystytty noudattamaan. Pyrittiin kuitenkin siihen, että kun sävelkorkeus oli valittu, niin siinä pysyttäisiin tutkittavan vokaalin kohdalla ilman suuria virevirheitä.

Tehdyistä äänityksistä tutkittiin, ovatko vokaaleille ominaiset formanttialueet nähtävissä äänen spektristä sillä tarkkuudella, että oppilaatkin voisivat ne havaita koulussa. Tarkastellaan, onko ammattilaisten, amatöörien ja aloittelijoiden äänten spektreissä eroja ja että löytyykö kokeneiden laulajien äänistä laulajan formantti suunnilleen välillä 2700-3200 Hz.

Tässä osiossa tutkittiin myös, saadaanko eri vokaalien formantit näkyviin tuottamalla niitä pelkästään kuiskaamalla, ilman sävelkorkeutta. Tämä havainnollistaa, että vokaalit voidaan kuulla ja havaita myös äänessä, jolla ei ole sävelkorkeutta.

4.2 Mittalaitteisto

Tässä työssä käytettiin vain työkaluja, joita oppilailla on käytössä koulussa, pois lukien mikrofonit, joita ei joka koulussa välttämättä ole. Tähän sisältyvät LoggerPro:n lisäksi MS-office- tuotteet/Libreoffice sekä ilmaiset mobiilisovellukset. Tarkastellaan, onko mobiililaitteillakin mielekästä tutkia ääniä.

Mittalaitteistona käytetään LoggerPro -ohjelmaa ja siihen kuuluvaa mikrofonia, mutta varmuuden vuoksi ääni tallennetaan tavallisella Shure bg 4.1-kondensaattorimikrofonilla Audacityyn. Käytetään samaa etäisyyttä kaikissa tapauksissa.

Tämän lisäksi käytetään myös ilmaista Spectroid -mobiilisovellusta, joka oli ladattu Googlen Play Storesta.



Kuva 12: Mikrofonit, joilla mittaukset tehtiin



Kuva 13: LabQuest Mini ja Audient iD4 kytkettynä tietokoneeseen

4.3 Koehenkilöt

Valittiin seitsemän koehenkilöä, kolme naista ja neljä miestä (maallikko, laulunopiskelija, laulunopettaja yms. ammattilainen, miesten tapauksessa maallikkoja oli 2 kpl).

Koehenkilöt valittiin osittain pop & jazz konservatoriosta, sillä olen itse siellä opiskelijana ja sain helposti muutamia kokeilaita sitä kautta. Maallikkolaulajat hankittiin muualta ja olivat minulle ennestään tuttuja henkilöitä.

5. Tulokset

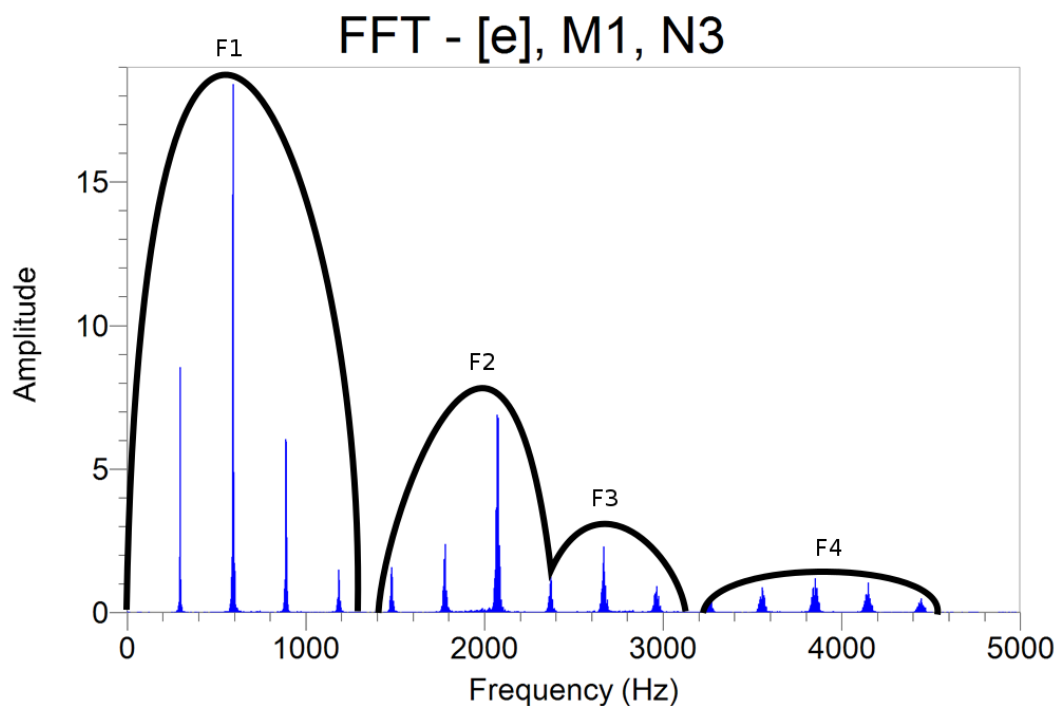
Äänitetyistä vokaaleista saatiin viidenlaisia kuvaajia. LoggerPro:n avulla luotiin M1, M2 (vuotoinen), M2 (twang) -mekanismeilla tehtyjä ja näiden lisäksi kuiskattuja kuvaajia. Näiden lisäksi saatiin jokaisesta kokelaasta myös Spectroid -sovelluksen luomia kuvaajia. Tarkastellaan alla esimerkkejä jokaisesta näistä.

Jokaiselta kokelaalta tuli yli 20 kuvaajaa äänityksistä. Tässä työssä tarkastellaan vain muutamia niistä kuvaajista.

Kokelaat on nimetty lyhentein, joissa alun kirjain tai kirjainpari kertovat sukupuolen, eli N = nainen, MS = mies (valittu MS, jotta ei sekoittuisi mekanismiin M). Lopun numero kertoo, onko kyseessä ammattilainen (3), laulunopiskelija (2) vai maallikko (1). Maallikkomiehiä oli 2 kappaletta, joten aineistosta löytyy sekä MS1.1, että MS1.2.

5.1 Spektrien tulkinta

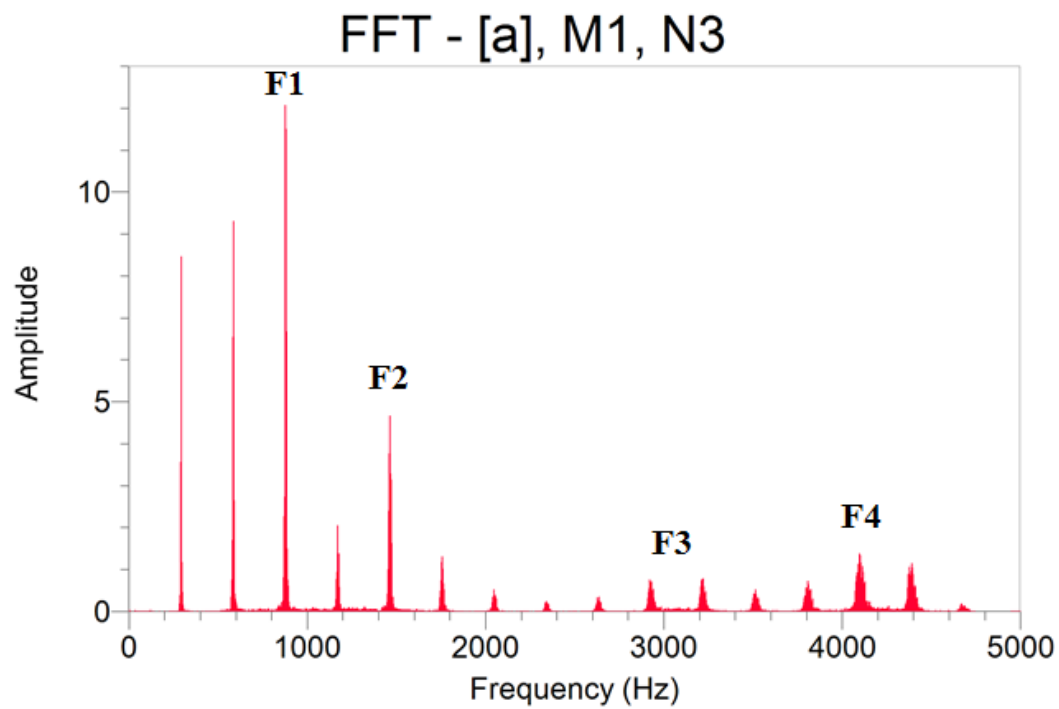
Jos kuvaajiin sovitetaan verhokäyrä, erottuvat vokaalien formantit huippuina alla olevan kuvan mukaisesti.



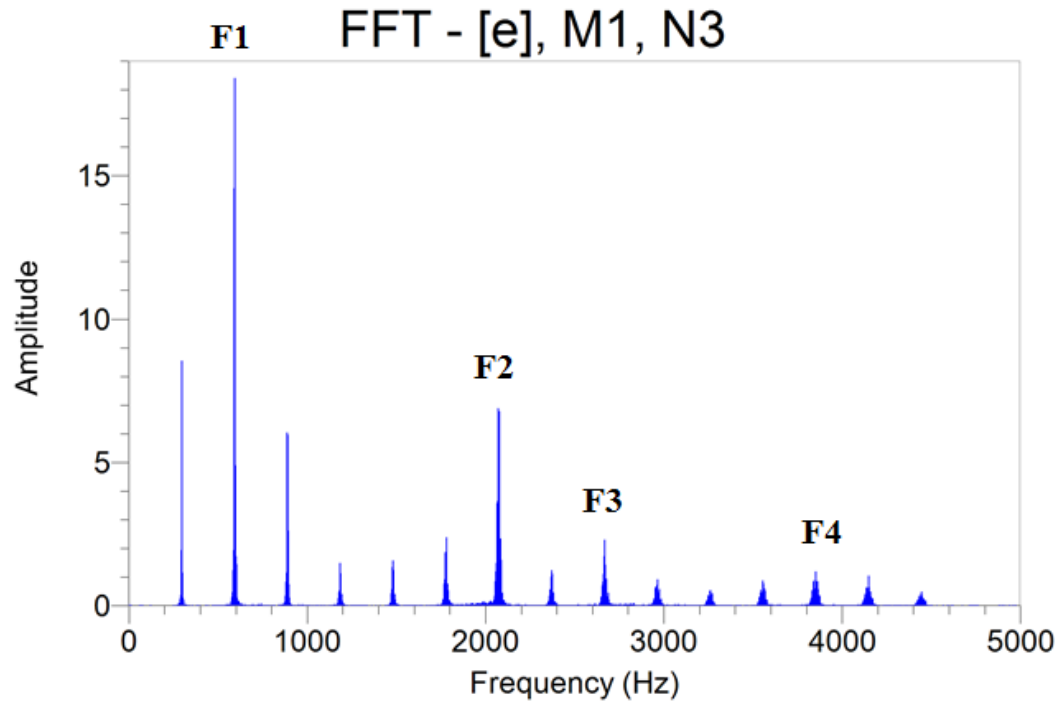
Kuva 14: Spektrien tulkintaa, kyseessä vokaali [i]. Formantit erottuvat niiden väliin jäävien notkojen avulla. F = formantti.

Formantteja on tulkittu kuvan osoittamalla tavalla ja formanttien huippujen taajuudet on kirjattu taulukoihin 1-4.

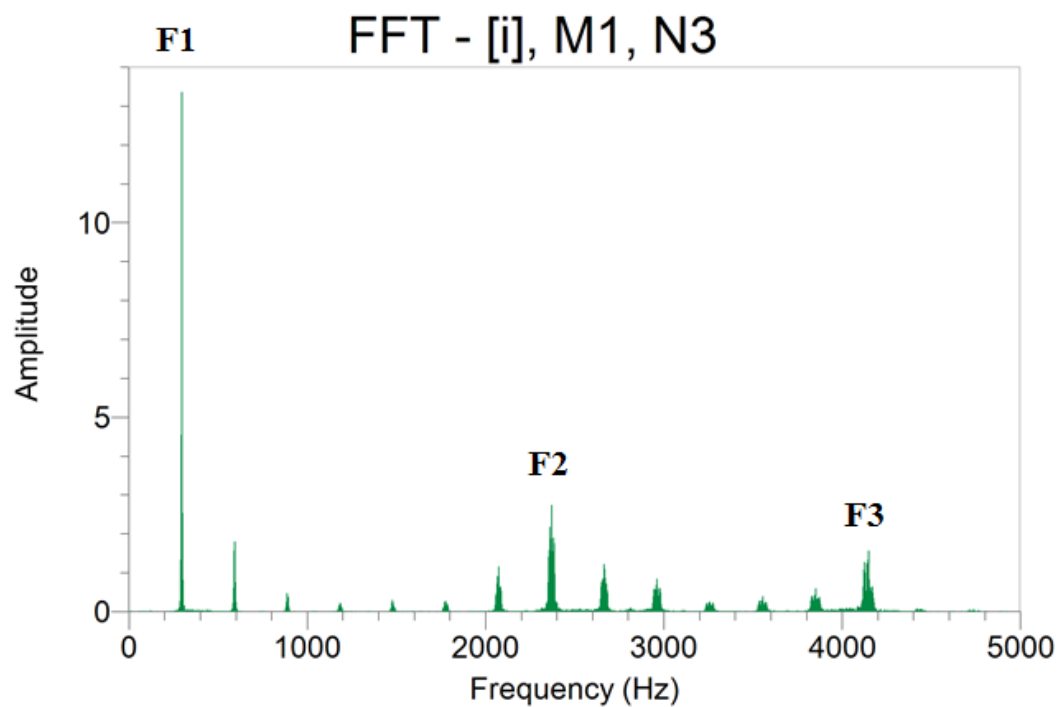
N3 M1 spektrit:



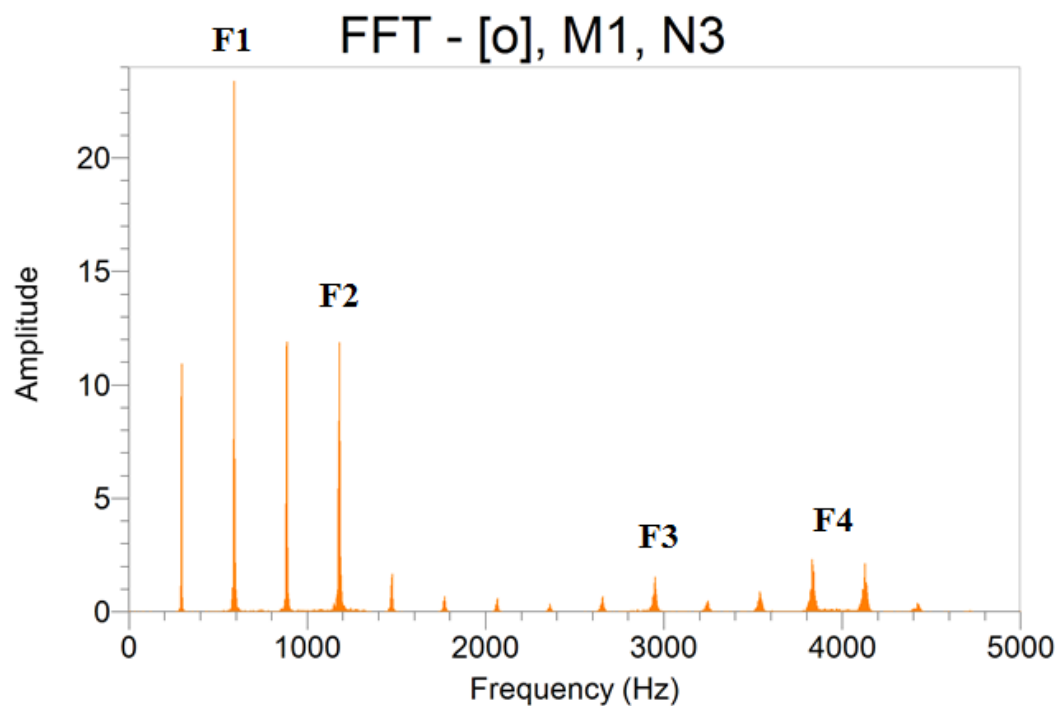
Kuva 15: [a], M1 mekanismi, nainen, ammattilainen



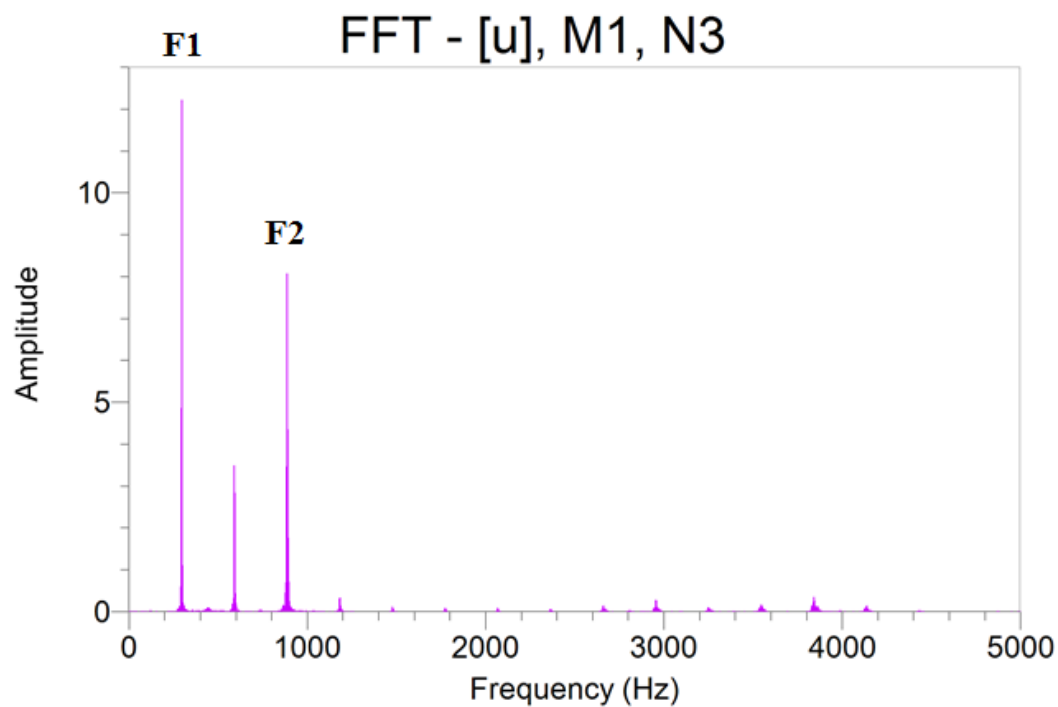
Kuva 16: [e], M1 mekanismi, nainen, ammattilainen



Kuva 17: [i], M1 mekanismi, nainen, ammattilainen. Hieman epäselvää, onko F1 kohdassa 300 Hz vai onko kyse vain perustaajuudesta

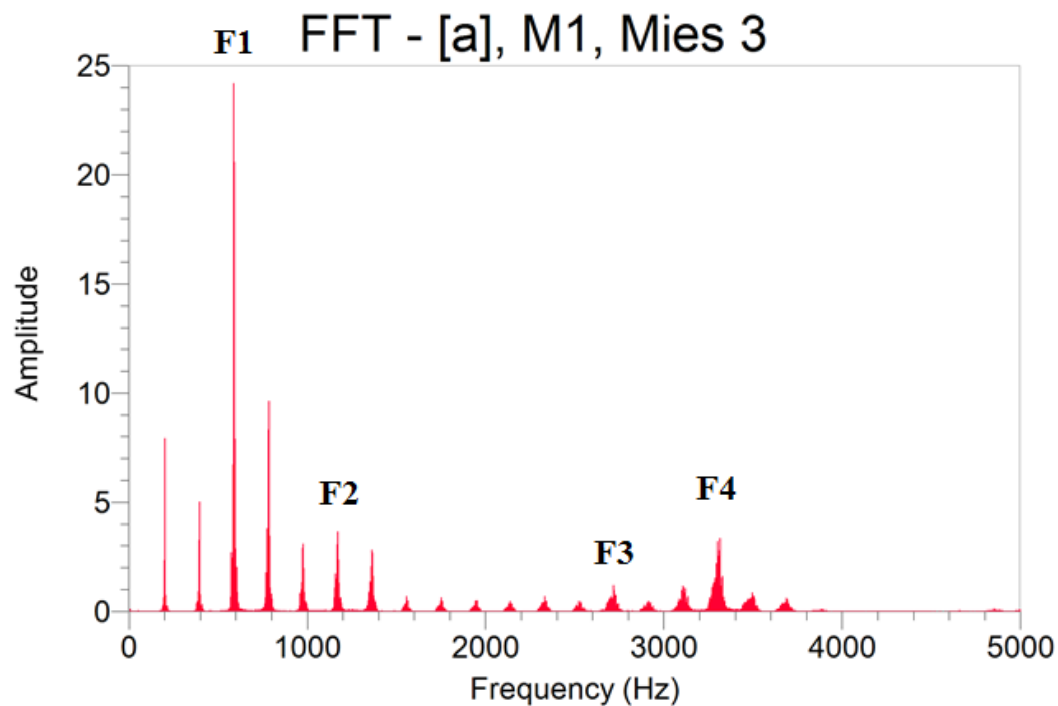


Kuva 18: [o], M1 mekanismi, nainen, ammattilainen. Päätelty, että F2 on n. 1200 Hz, vaikka onkin hieman epäselvää, onko kyseessä vain yksi formantti F1

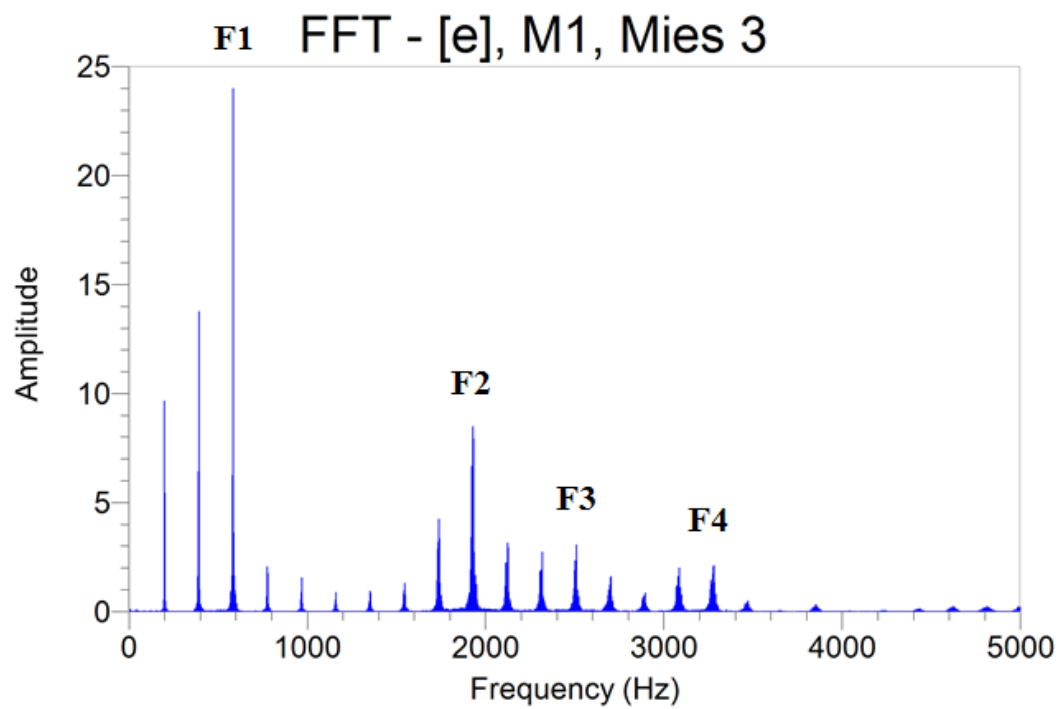


Kuva 19: [u], M1 mekanismi, nainen, ammattilainen. Päätelty, että ensimmäisen yläsävelen kohdalle osuisi myös F1, vaikka onkin hieman epäselvää, onko kyse vain voimakkaasta perustaajuudesta.

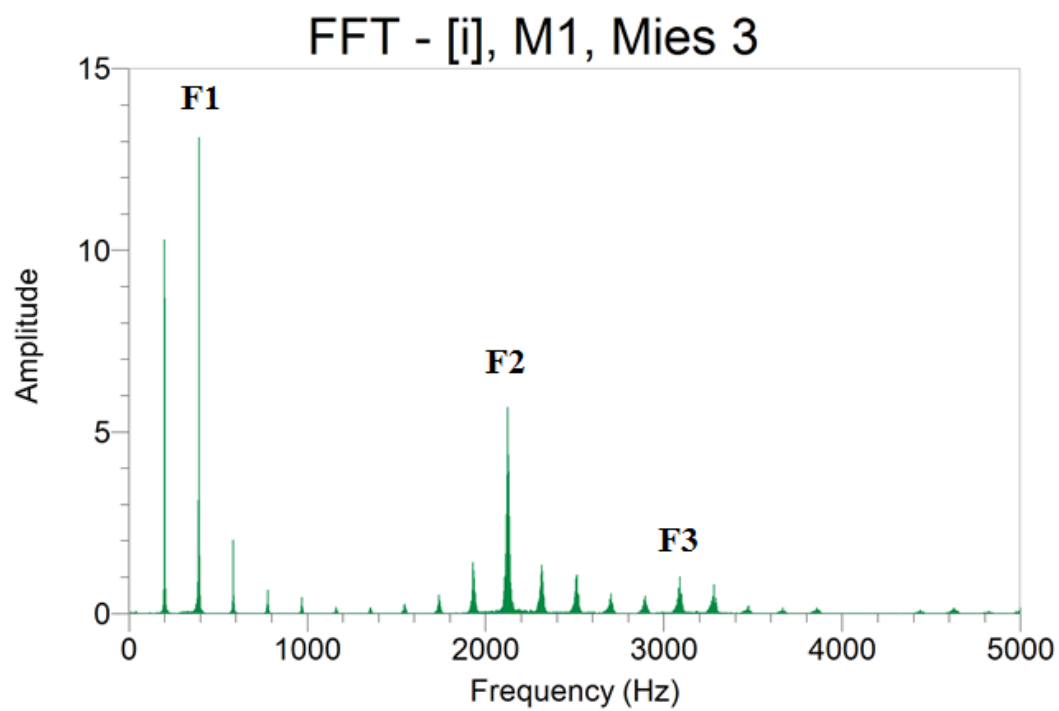
MS3 M1 spektrit:



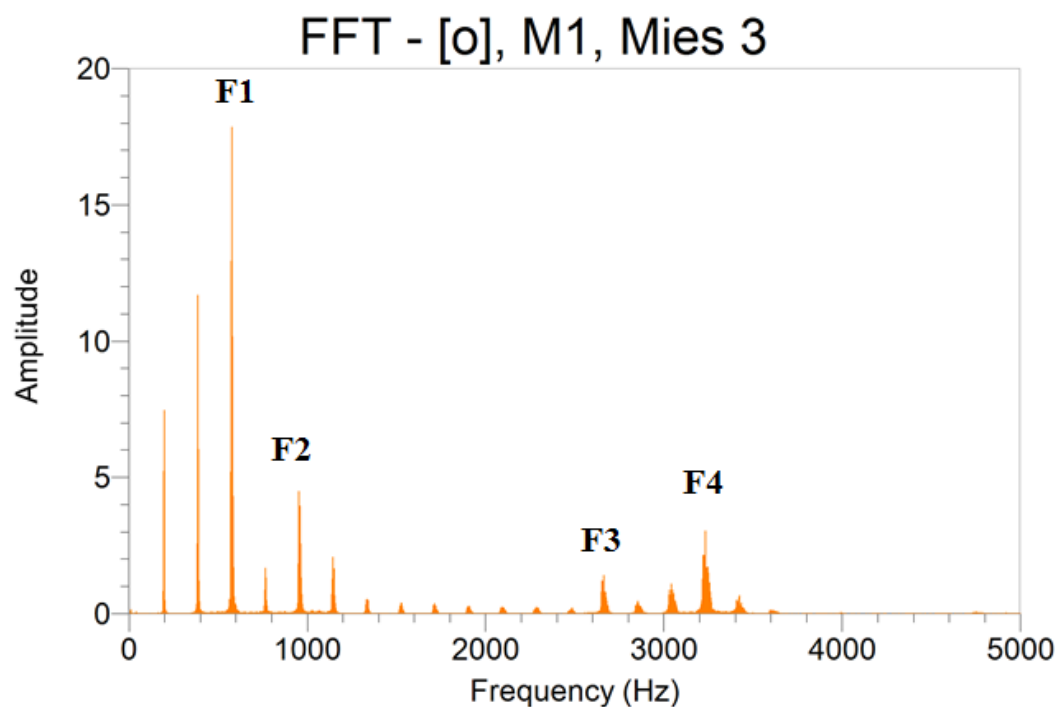
Kuva 20: [a], M1 mekanismi, mies, ammattilainen



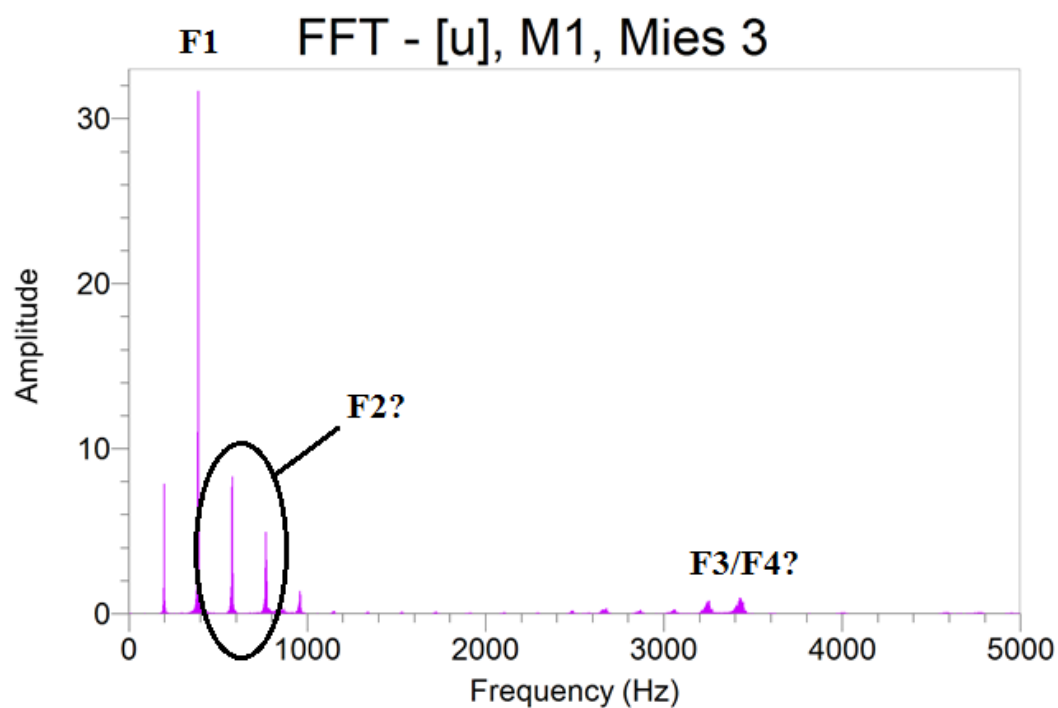
Kuva 21: [e], M1 mekanismi, mies, ammattilainen



Kuva 22: [i], M1 mekanismi, mies, ammattilainen



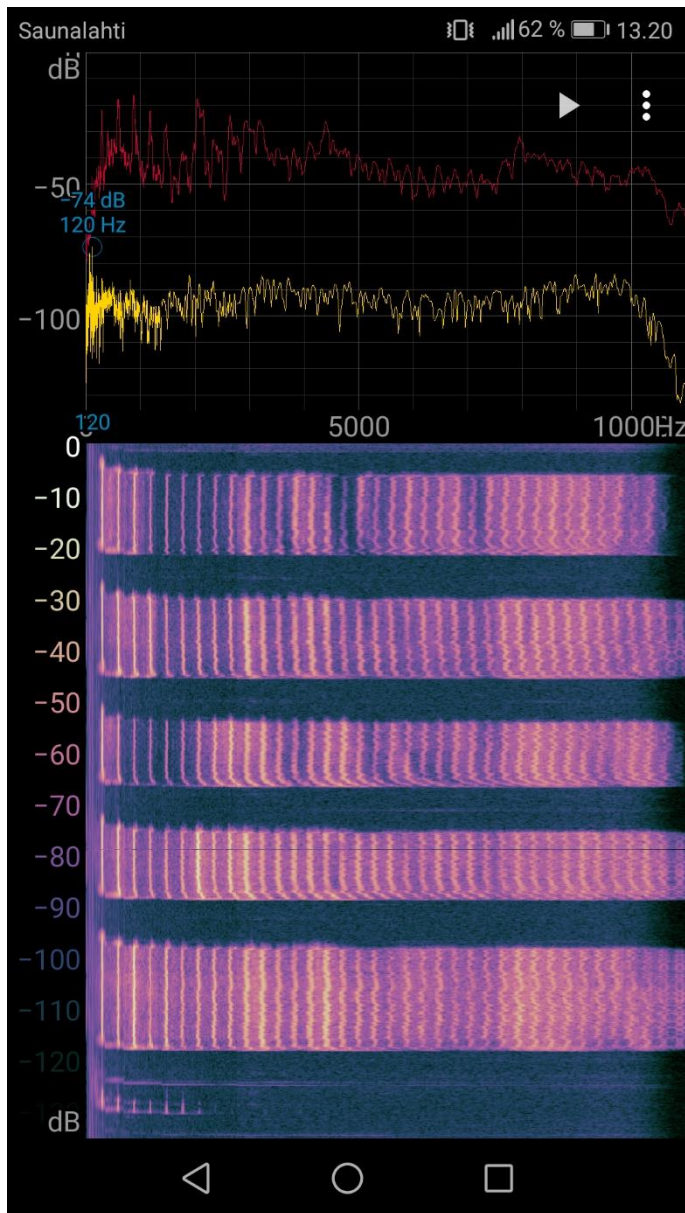
Kuva 23: [o], M1 mekanismi, mies, ammattilainen



Kuva 24: [u], M1 mekanismi, mies, ammattilainen. Tulkinnan vaikeutta kuvaajassa. F1 on luultavasti oikein merkitty, mutta ei ole selvää, onko F2 myös näkyvissä kuvassa. Vokaalin u tapauksessa ensimmäiset kaksi formanttia ovat kuitenkin ymmärtääkseni melko lähellä toisiaan.

5.2 Spectroid

Äänityksiä tehtiin myös Spectroid-sovelluksella, jotta nähtäisiin, antaako se luettavia ja selkeitä tuloksia mobiilimuodossa. Alla on Spectroid-sovelluksella tehty kuvaaja M1 mekanismilla tuotetuista vokaaleista [a]–[u]. Kirkkaat kohdat spektrogrammissa kuvaavat voimakasinteesiteettisiä taajuuksia ja merkitsevät alueita, joissa eri formantit sijaitsevat.



Kuva 25: Alhaalta ylös: [a], [e], [i], [o], [u], M1 mekanismi, nainen, ammattilainen

Spectroidin käytöllä on paikkansa, mutta se ei sovellu tarkempaan äänten tutkimiseen, sillä osäänesten välisiä voimakkuussuhteita ei näe kuin värieröjen esittämällä tarkkuudella. Sen sijaan se sopii hyvin oppilaiden tekemiin pintapuolisiin tarkasteluihin. Tämän takia tätä tutkielmaa varten taulukoidaan vain LoggerPro:sta saadut arvot.

5.3 Formanttien taajuudet eri koehenkilöillä

Alla on taulukoitu jokaisen kokelaan ensimmäisten neljän formanttien taajuudet. Jos formanttia ei näy kuvassa, on se jätetty tyhjäksi taulukossa.

M1	a				e				i				o				u			
	F1	F2	F3	F4	F1	F2	F3	F4	F1	F2	F3	F4	F1	F2	F3	F4	F1	F2	F3	F4
N3	900	1450	3100	4200	600	2100	2650	3850	300?	2400	4150		600	1200	3000	3900	300?	900	2950*	3850*
MS3	600	1200	2700	3300	600	1950	2500	3250	400	2100	3100		550	950	2650	3200	400		2650*	3400*
N2	900	1350	3100	4050	600	2200	2850	3650*	400	2750	4100*		600	1150	2700	3700*	400			
MS2	600	2600	3550*		400	1700	2550	3350		2000	2400	3500	400	2600*	3000*	3600*	400	800	2750*	3300*
N1	750	2650*		3800*		2150	2850*	3800*		2650*	3950*				2650*	3850*	-			
MS1.1	600	1150	2050*	2450*	450	950	1700	2500	300	2150	2450	3350	600	1000	2450	3200	300	900	2400*	2750*
MS1.2	450	900	1200?		450	900	1800	2500		2100*	2550*		-					900		3100*

Taulukko 1/M1

Yleisiä huomioita: M1 kuvaajista näki selkeästi yksittäiset osääneket ja myös korkeaenergiset formantit, vaikkakin jotkin formantit olivat osalla henkilöistä vaikeasti nähtävissä, koska ylätaajuuksilla ei ollut niin paljon energiaa kokemattomilla laulajilla.

M2 vuotoinen	a				e				i				o				u			
	F1	F2	F3	F4	F1	F2	F3	F4	F1	F2	F3	F4	F1	F2	F3	F4	F1	F2	F3	F4
N3	1000	3150*				3150				3200			1000	3150			-			
MS3		2600				1750				1750*			-					3500*		
N2	900	3100*			900	2200	3100			3100			900	3100*	4000*			3150*		
MS2		3100*	3950*			1750	3000	3950*	1750*	2650*				3100*			-			
N1	750	2850*	3950*			1850	3000	4100*	1500*	2950	4100*			2650*	3800*			2700*	3800*	
MS1.1		2650	4000*			1100	2750	3500	1850	2450*				3000			2850*			
MS1.2		2850*				2150*			2100*		3800*		1000				-			

Taulukko 2/M2 (vuotoinen)

Yleisiä huomioita: M2 (vuotoinen) kuvaajia tulkittaessa nähtiin huomommin korkeita osääneksiä. Energia tuntui keskittyvän perustaajuuteen ja sitä ympäröivään muutamaan osääneeseen ja vaimeni sen jälkeen keskimäärin hyvin nopeasti. Formantteja eri erottanut yhtä hyvin, kuin M1 mekanismilla.

M2 twang	a				e				i				o				u			
	F1	F2	F3	F4	F1	F2	F3	F4	F1	F2	F3	F4	F1	F2	F3	F4	F1	F2	F3	F4
N3	1200- 1400	3100			1000	2600	4650*			2800- 3000	4650		1050		3650*		1000	3150*		
MS3	900	2650	4000*		1800	2700	4450*			2250	4500		900	2250*	3600*			2250*	4050*	4950*
N2	1300	3500			1350	2650			400	3100	4000		1350	3100	4000			3500*		
MS2	1350	3150			900	1800	3100			2200	4400*		900	3100	4050*	4950*		3100		4900*
N1	1150	2850	4000*		1700		4550			2400	4750*		1250		4200*			2600*		
MS1.1																				
MS1.2		3100*			1750		3950*			2200				3000	3900*		-			

Taulukko 3/M2 twang

MS1.1 ei osallistunut tähän

Yleisiä huomioita: M2 (twang) kuvaajista nähdään keskimääräisen äänenvoimakkuuden nousu kautta spektrin. Huomataan myös, että verrattuna M2 (vuotoinen) kuvaajiin, korkeilla taajuuksilla on tällä kertaa paljon energiaa, pois lukien vokaalit o ja u, joiden spektrissä näkyy voimakkaana keskimäärin perustaajuus ja muutama sen läheinen osäänes. Formantit on helpompi havaita tällä mekanismilla, kuin M2 (vuotoisella). Toinen miesmaallikko (MS1.1) ei saanut aikaiseksi ääniä tällä mekanismilla, eikä hänen tuloksiaan sen takia ole tässä.

Kuiskaus	a				e				i				o				u			
	F1	F2	F3	F4	F1	F2	F3	F4	F1	F2	F3	F4	F1	F2	F3	F4	F1	F2	F3	F4
N3	1100	1350	1600	3150	950	2500	3150	4200	400	1050*	3050	3500	850	1100	1550?	3050	450	750	3050	3600
MS3	650	900	1200	1450	750	2100	2600	3300	750	2400	2750?	3250	750	1050	2600	3400		700-950+	2650	3000
N2	800	1100	1750	2800	900	2600	3150		560*	950*	3000	3600?	950	1250	3050*	4150*	500	800-1000+		
MS2	800	1300	2350	3050*	650	1750	2400	3500	400	2000	2350	3300	750	1000	2450	2650	450	650	850	2650
N1	1050	2750	3950	4850	850	2350	2800	3900	450*	2700	3150	4000	800	1200	2800	3650	500	750-950+		
MS1.1	750	1100	1500	2550	700	1750	2100	2400	400	2300	2600	3400*	700	900	2650	3600	400	700		
MS1.2	850	1150	2900*		800	1950	2500	3650*	400	750	2300	2750	700	950		2950*	450	750		

Taulukko 4/Kuiskaus

Yleisiä huomioita: Kuiskaus-kuvaajia tulkittaessa nähtiin, että formanttialueet erottuivat pääsääntöisesti selkeinä jatkuvina kohoumina kuvaajissa. Osassa kuvaajia oli kuitenkin epämääräisiä taajuuksia matalilla taajuuksilla, etenkin vokaalin [u] tapauksessa. Päättelin tämän johtuvan siitä, että lähellä mikrofonia kuiskatessa ylimääräinen ilmavirta on osunut mikrofoniin ja aiheuttanut huminaa alueella n 50-200 Hz. Näitä taajuuspiikkejä ei ole siis huomioitu formanttitarkasteluun.

* = hyvin vaimea

+ = epäselvää, onko useampi formantti vai yksi

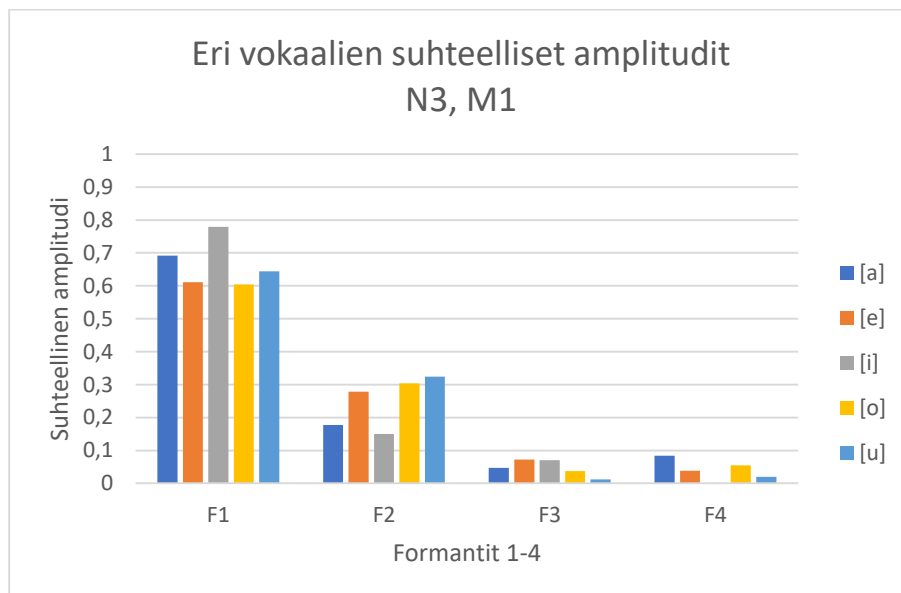
? = epäselvää, onko kyse vain turbulenssista/kohinasta/voimakkaasta perustaajuudesta tms.

5.3 Formanttien suhteelliset amplitudit eri vokaaleille

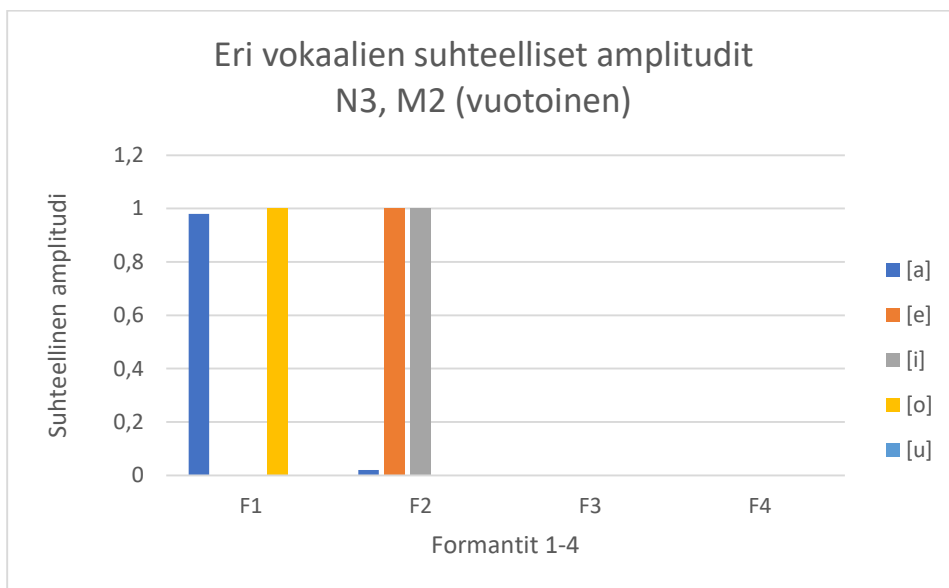
Alla listataan kaikkien kokelaiden spektreistä saadusta datasta piirretyt suhteellisten amplitudien kuvaajat. Suhteellinen amplitudi on jokaiselle vokaalille laskettu niin, että on laskettu yhteen kaikkien formanttien amplitudit ja sen jälkeen jokaisen yksittäisen formantin amplitudi suhteessa summaan.

Suhteelliset amplitudit laskettiin siksi, että voitaisiin nähdä, miten käytetty mekanismi vaikuttaa laulettuun vokaalin formanttien väliseen voimakkuuteen. Kuvaajat ovat järjestetty jokaisen kokelaan kohdalla mekanismien mukaan järjestyksessä M1, M2 (vuotoinen), M2 twang ja kuiskaus.

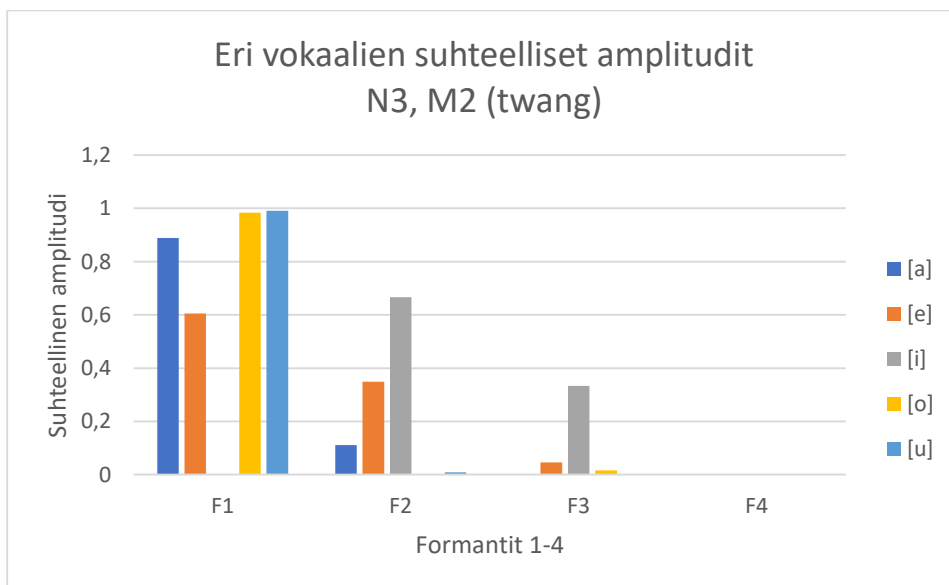
N3:



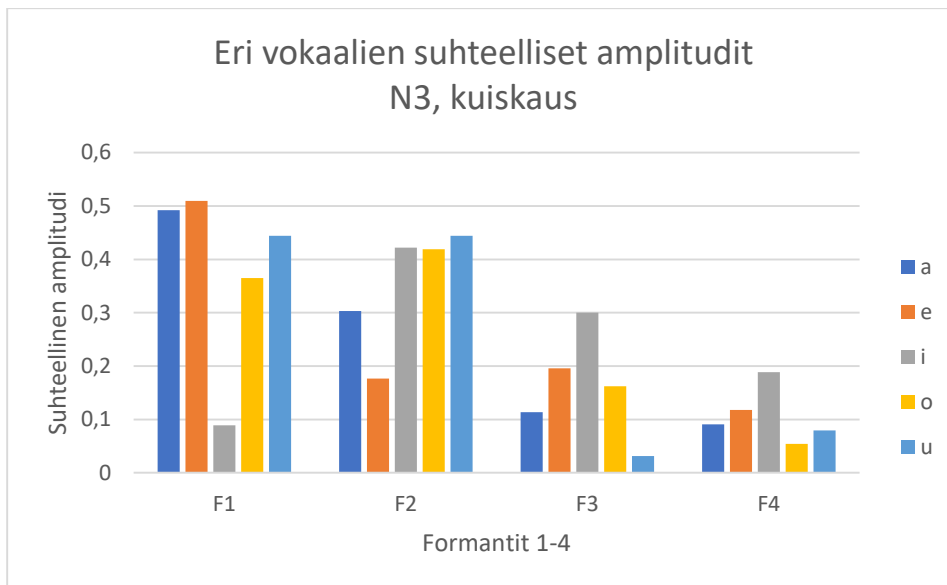
Kuva 26: Eri vokaalien suhteelliset amplitudit, nainen, ammattilainen, M1



Kuva 27: Eri vokaalien suhteelliset amplitudit, nainen, ammattilainen, M2 (vuotoinen)

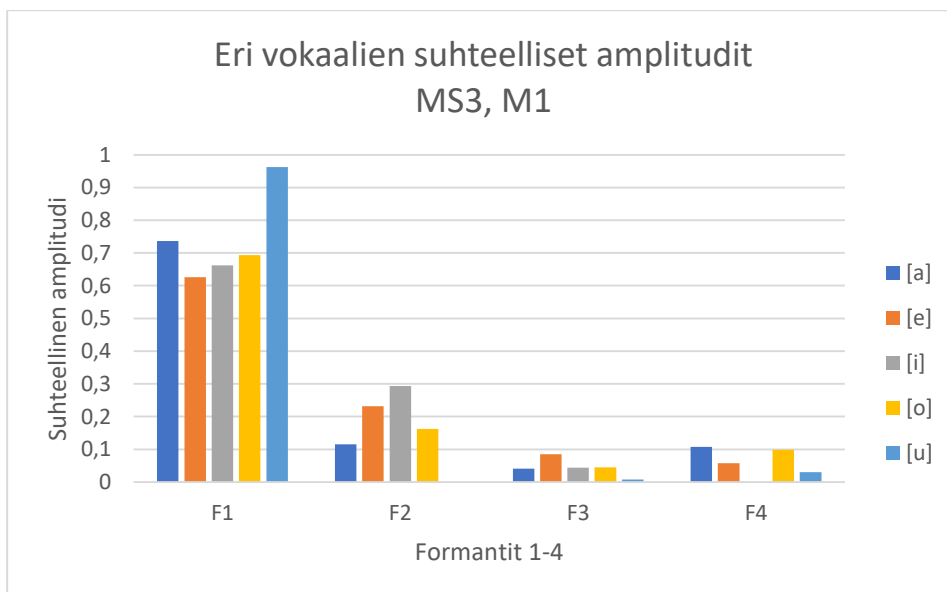


Kuva 28: Eri vokaalien suhteelliset amplitudit, nainen, ammattilainen, M2 (twang)

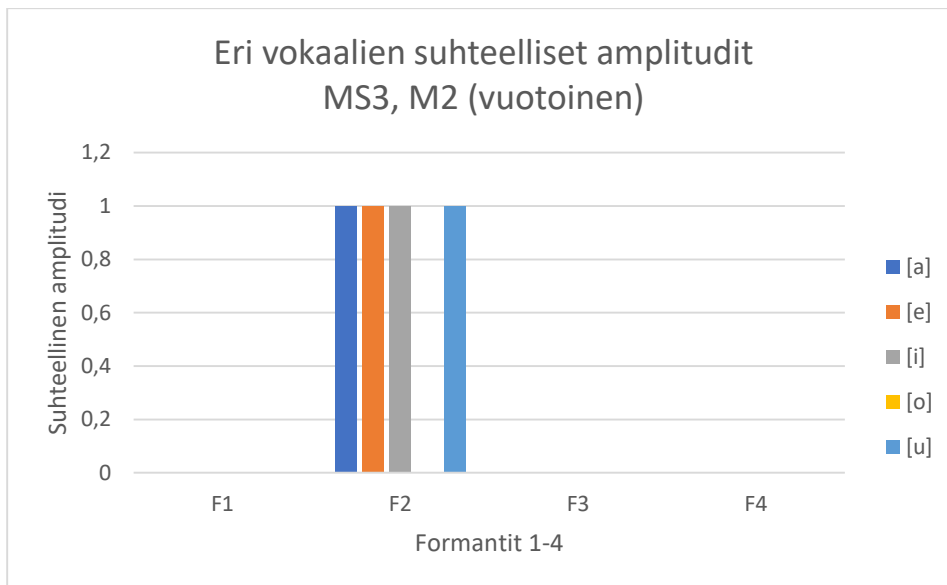


Kuva 29: Eri vokaalien suhteelliset amplitudit, nainen, ammattilainen, kuiskaus

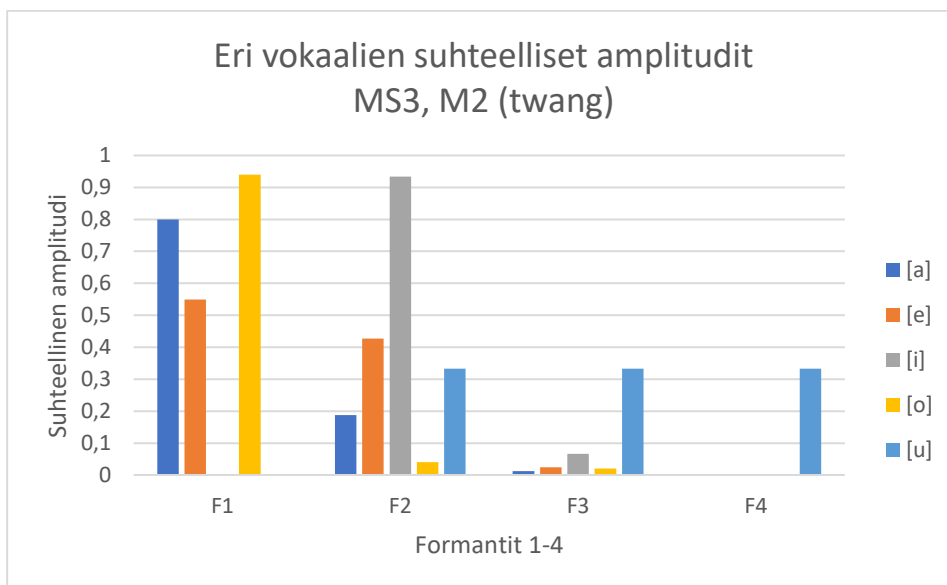
MS3:



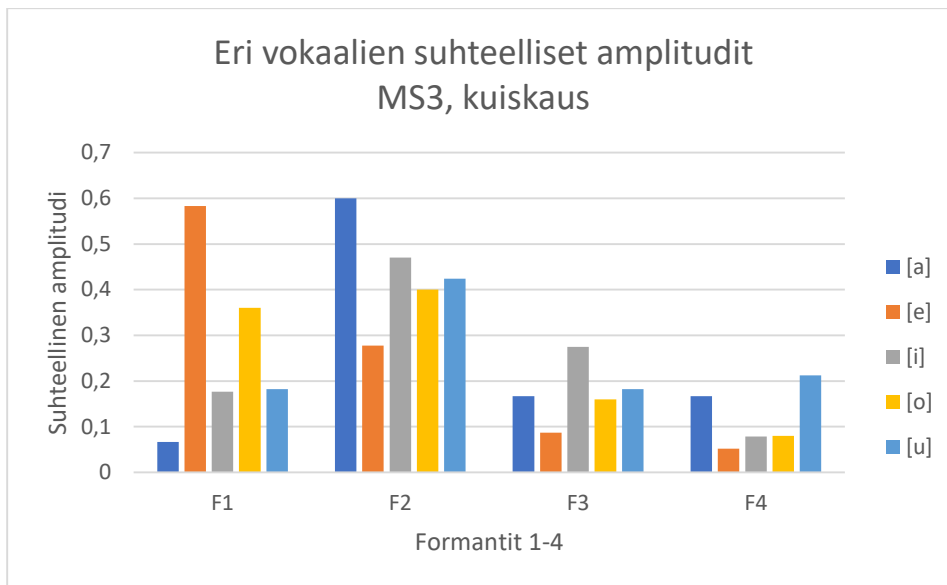
Kuva 30: Eri vokaalien suhteelliset amplitudit, mies, ammattilainen, M1



Kuva 31: Eri vokaalien suhteelliset amplitudit, mies, ammattilainen, M2 (vuotoinen).
Tässä kuvaajassa on vain yksi formantti ja vokaalin [o] formantit puuttuvat kokonaan.

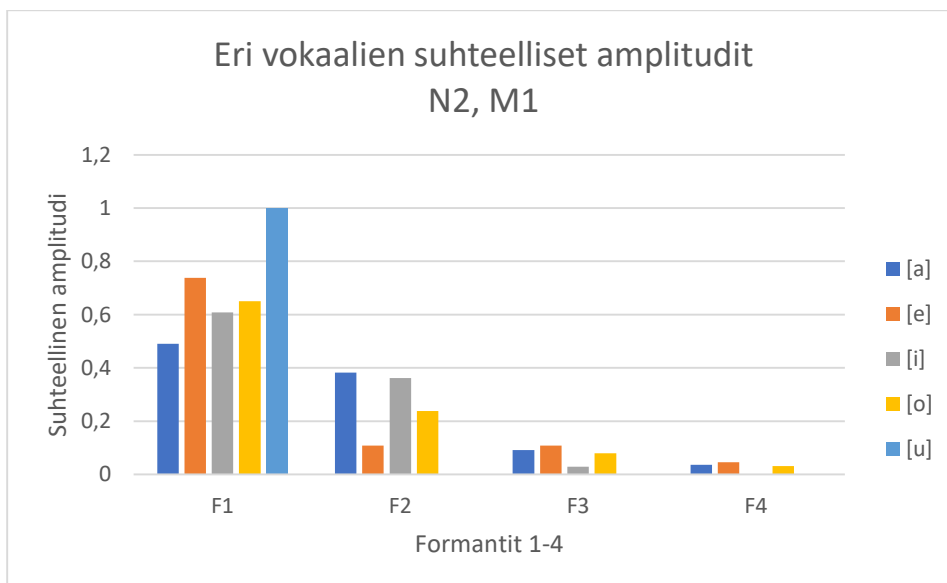


Kuva 3: Eri vokaalien suhteelliset amplitudit, mies, ammattilainen, M2 (twang)

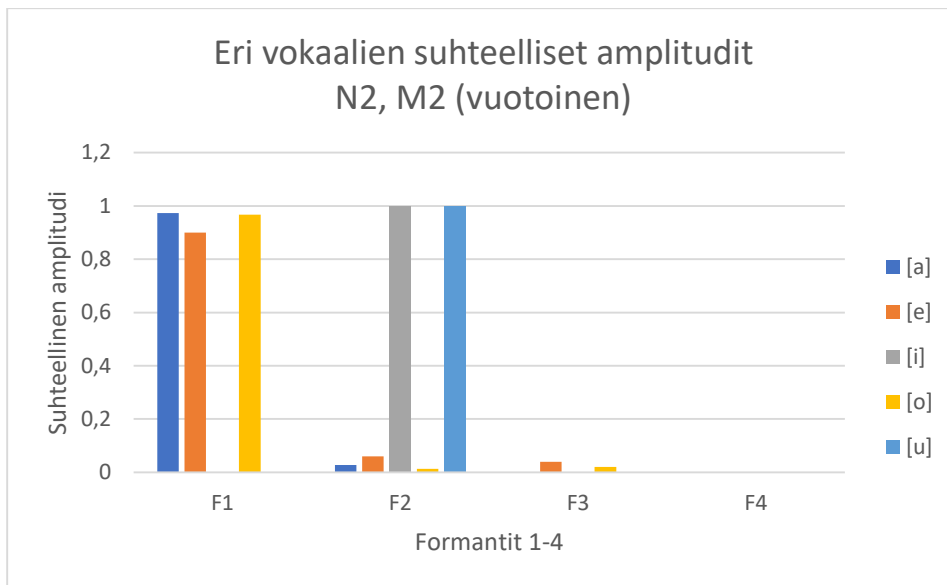


Kuva 33: Eri vokaalien suhteelliset amplitudit, mies, ammattilainen, kuiskaus

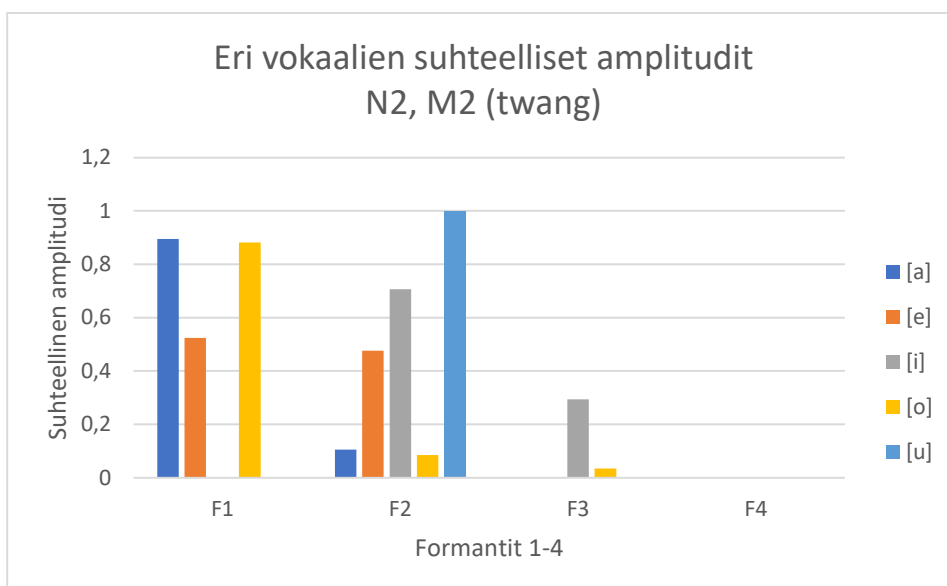
N2:



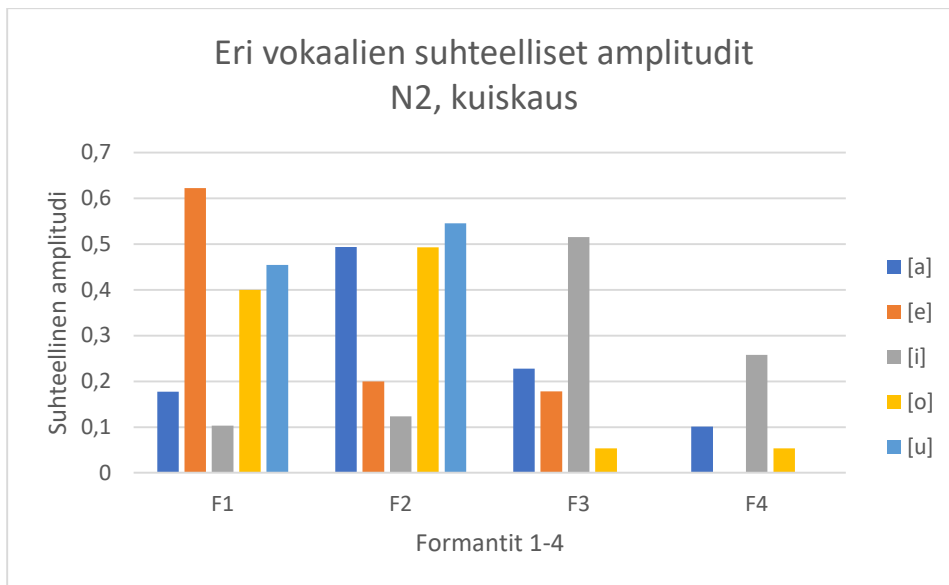
Kuva 34: Eri vokaalien suhteelliset amplitudit, nainen, laulunopiskelija, M1



Kuva 35: Eri vokaalien suhteelliset amplitudit, nainen, laulunopiskelija, M2 (vuotoinen)

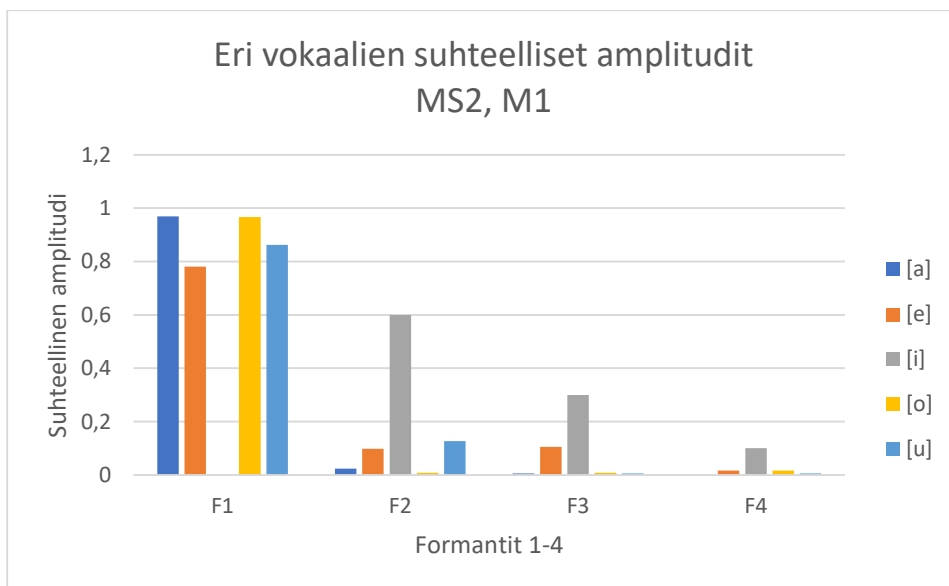


Kuva 36: Eri vokaalien suhteelliset amplitudit, nainen, laulunopiskelija, M2 (twang)

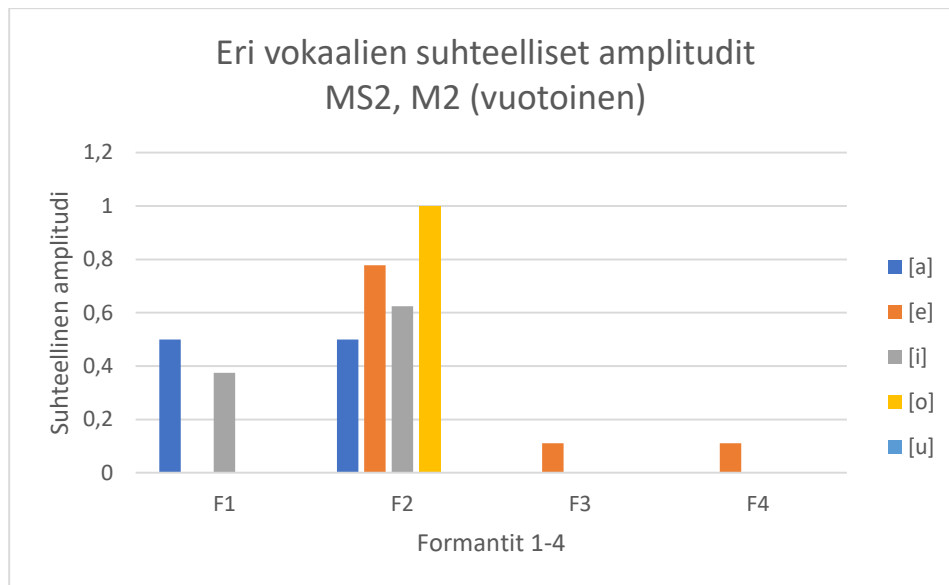


Kuva 37: Eri vokaalien suhteelliset amplitudit, nainen, laulunopiskelija, kuiskaus

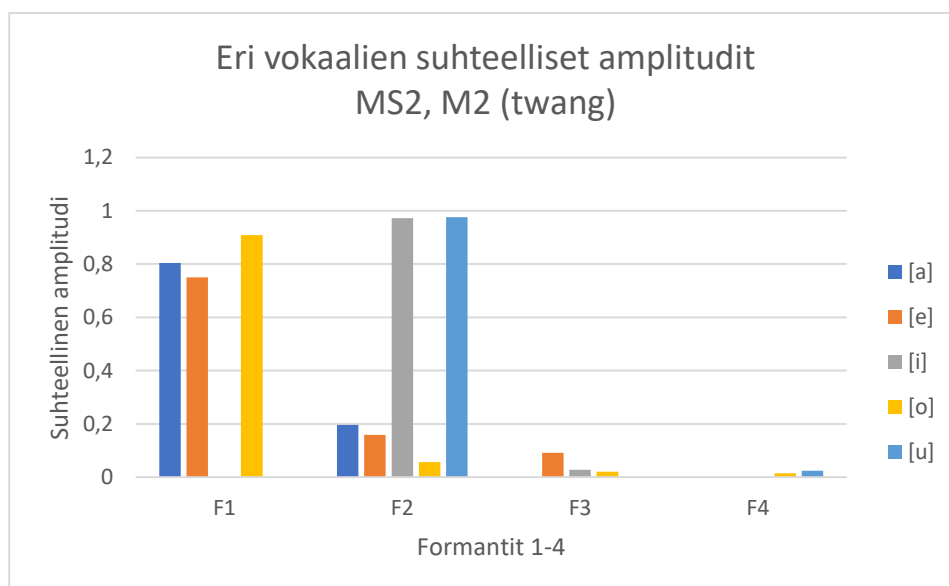
MS2:



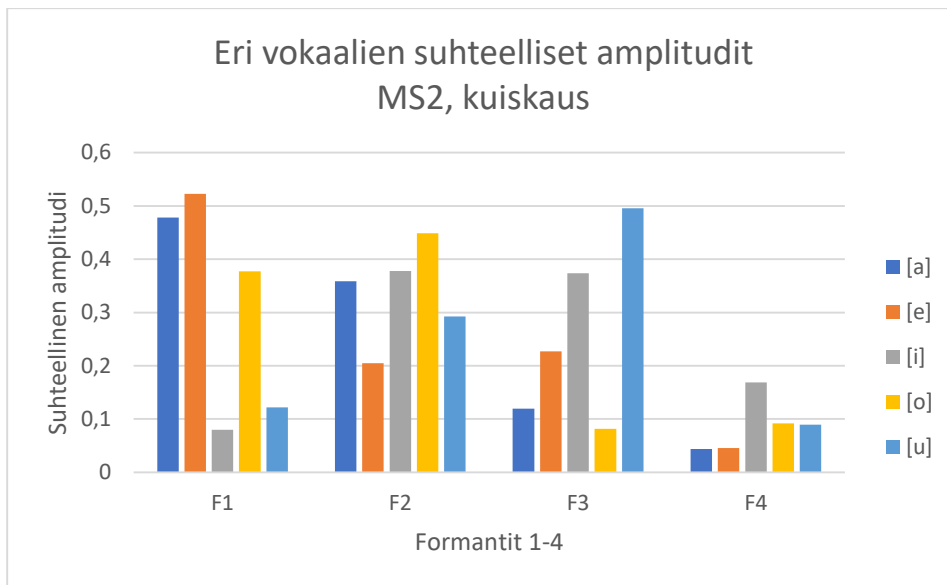
Kuva 38: Eri vokaalien suhteelliset amplitudit, mies, laulunopiskelija, M1



Kuva 39: Eri vokaalien suhteelliset amplitudit, mies, laulunopiskelija, M2 (vuotoinen)

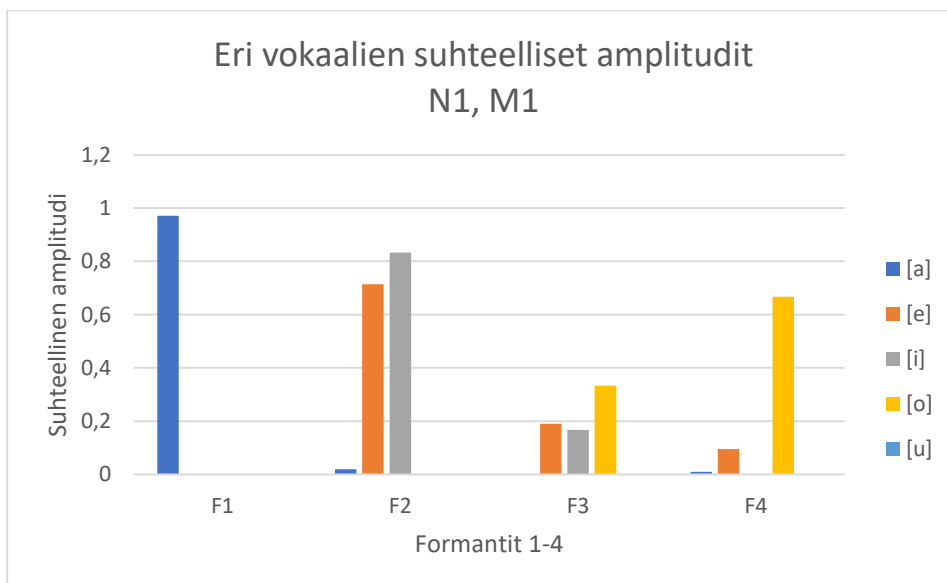


Kuva 40: Eri vokaalien suhteelliset amplitudit, mies, laulunopiskelija, M2 (twang)

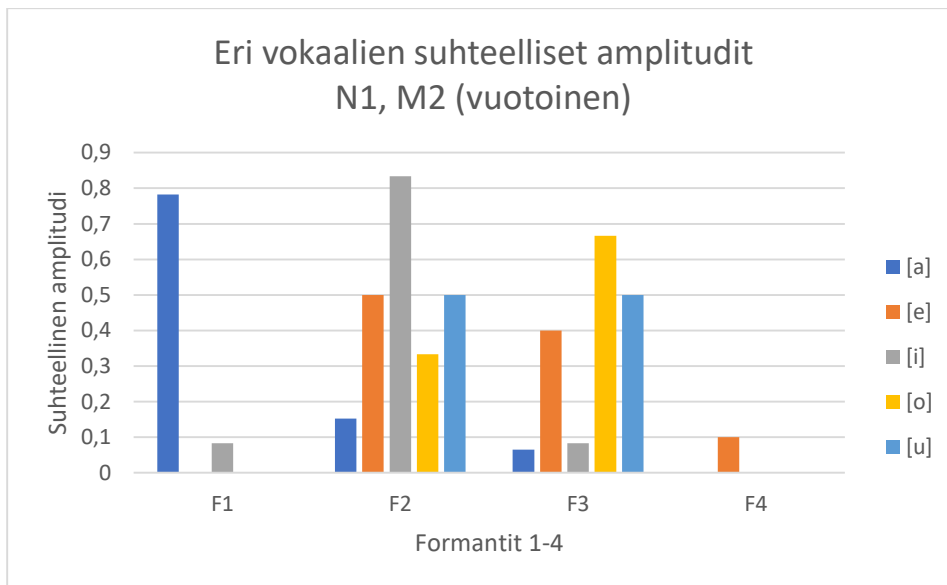


Kuva 41: Eri vokaalien suhteelliset amplitudit, mies, laulunopiskelija, kuiskaus

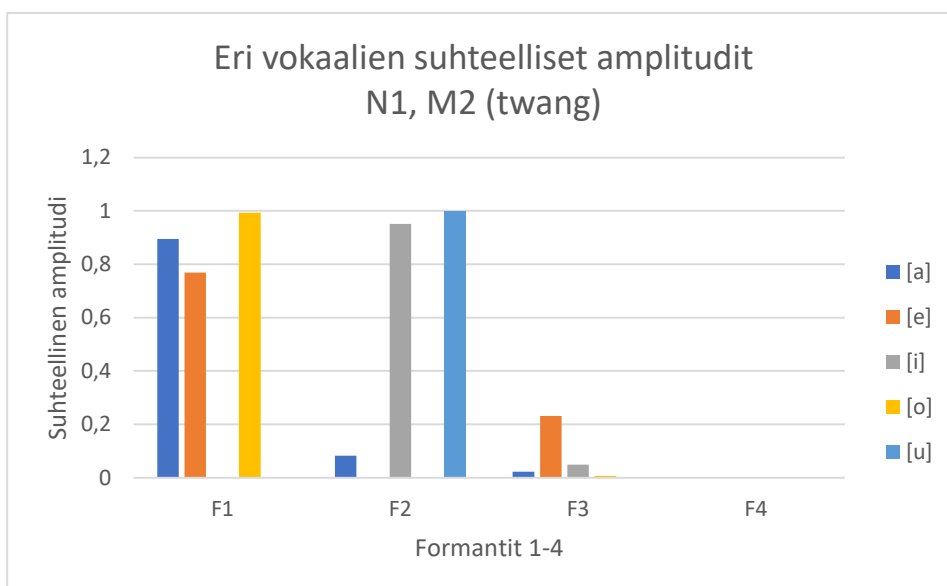
N1:



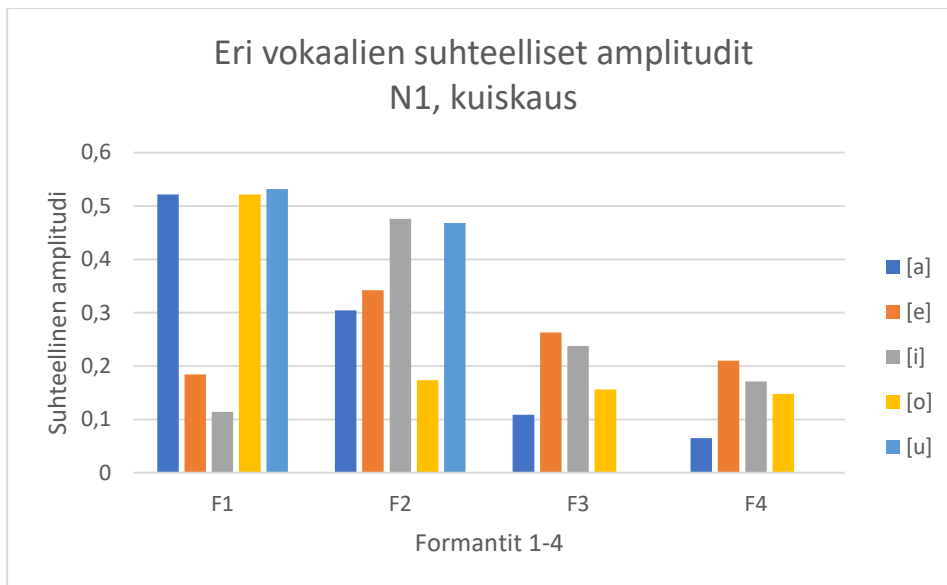
Kuva 42: Eri vokaalien suhteelliset amplitudit, nainen, maallikko, M1



Kuva 43: Eri vokaalien suhteelliset amplitudit, nainen, maallikko, M2 (vuotoinen)

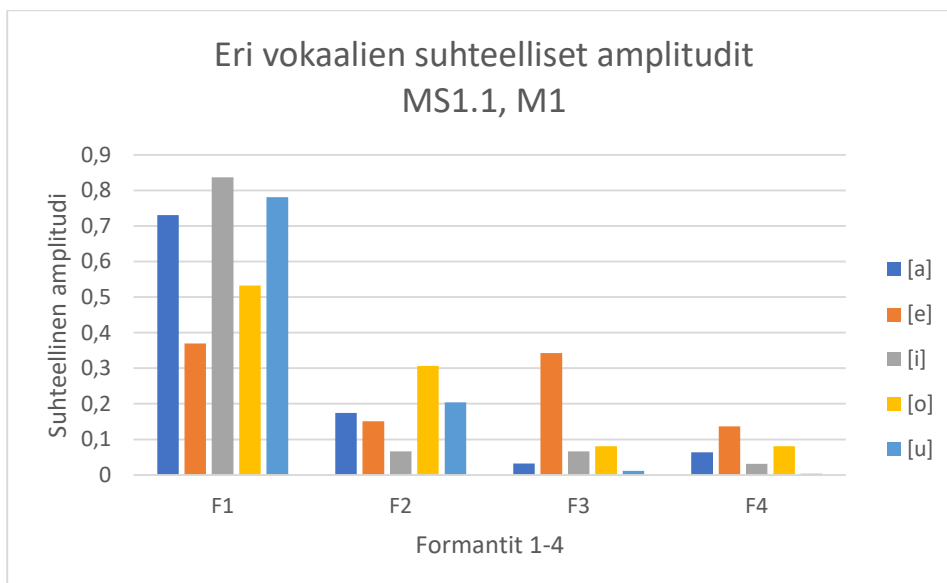


Kuva 44: Eri vokaalien suhteelliset amplitudit, nainen, maallikko, M2 (twang)

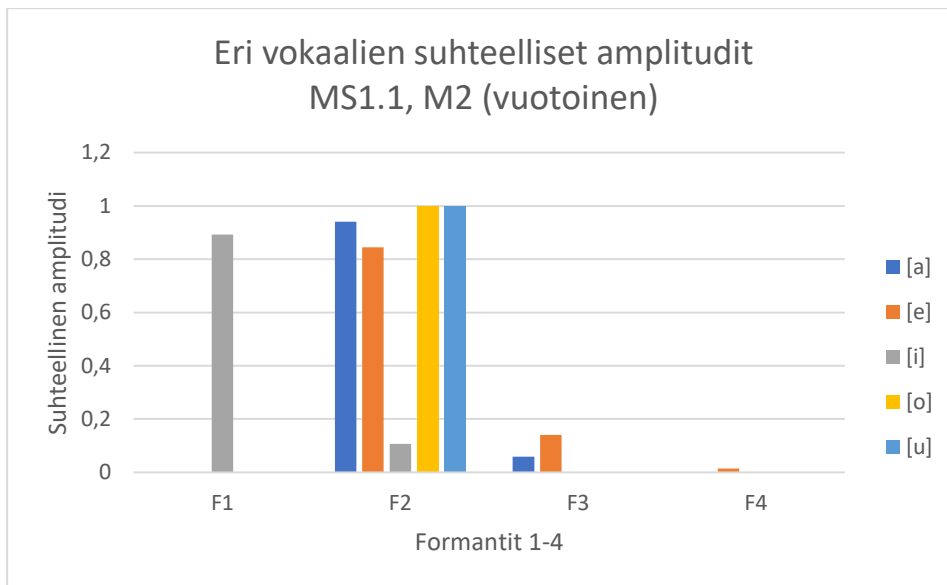


Kuva 45: Eri vokaalien suhteelliset amplitudit, nainen, maallikko, kuiskaus

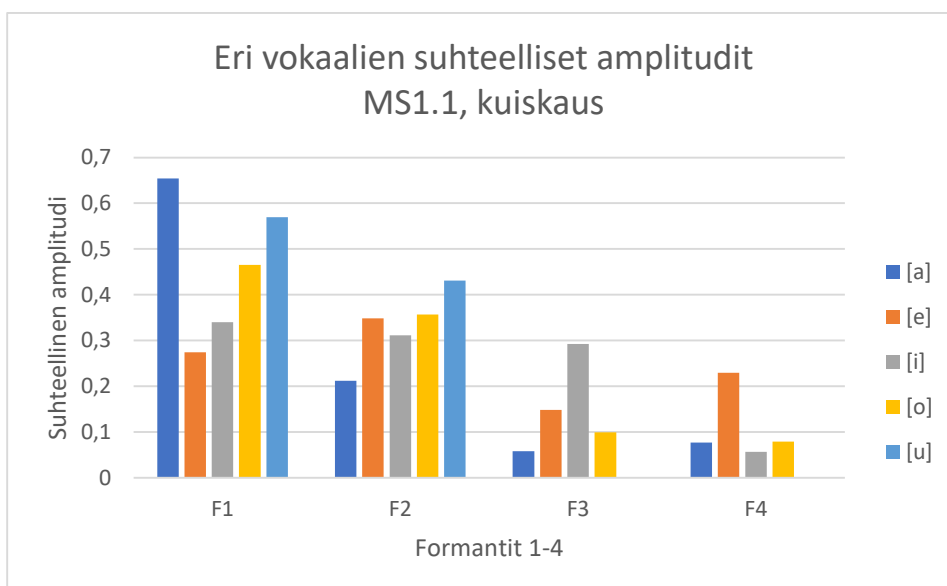
MS1.1:



Kuva 46: Eri vokaalien suhteelliset amplitudit, mies, maallikko, M1

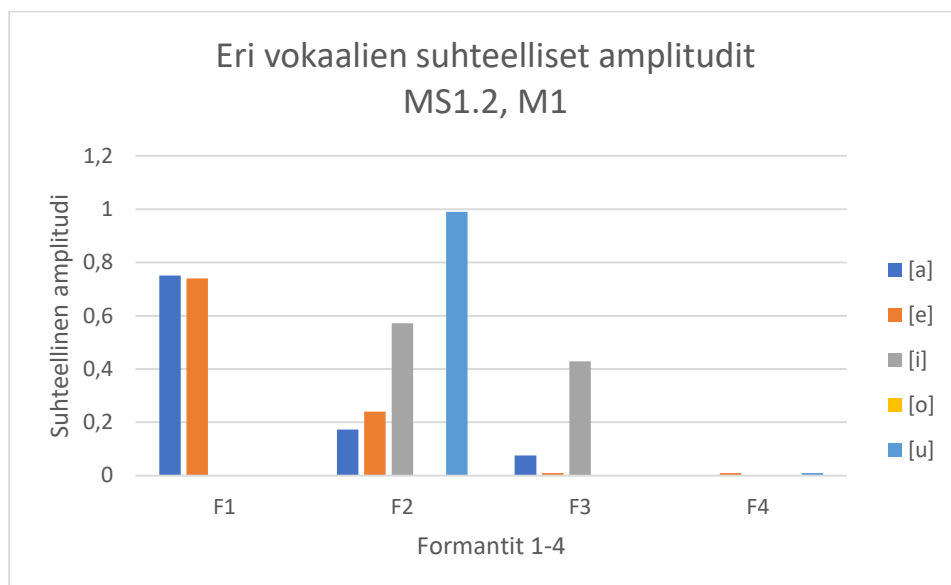


Kuva 47: Eri vokaalien suhteelliset amplitudit, mies, maallikko, M2 (vuotoinen)

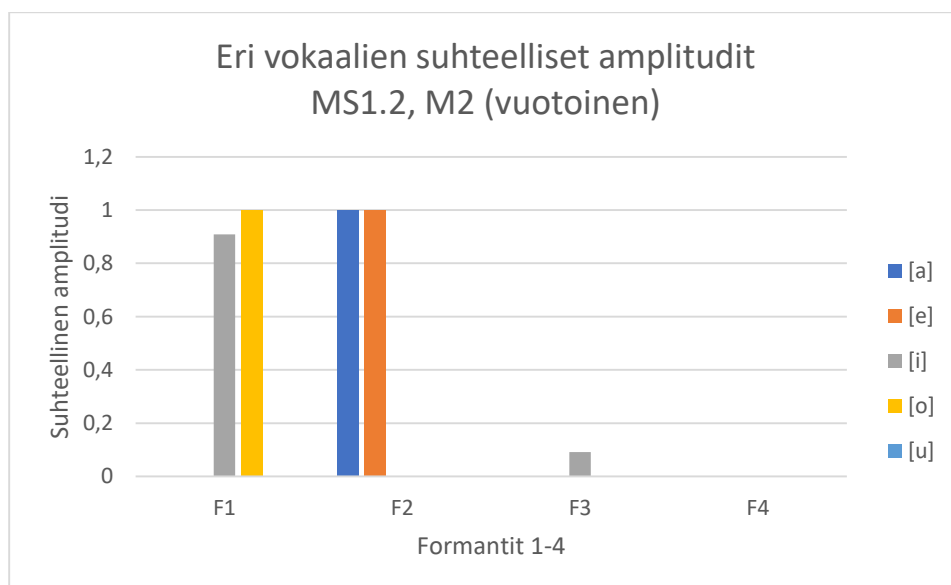


Kuva 48: Eri vokaalien suhteelliset amplitudit, mies, maallikko, kuiskaus

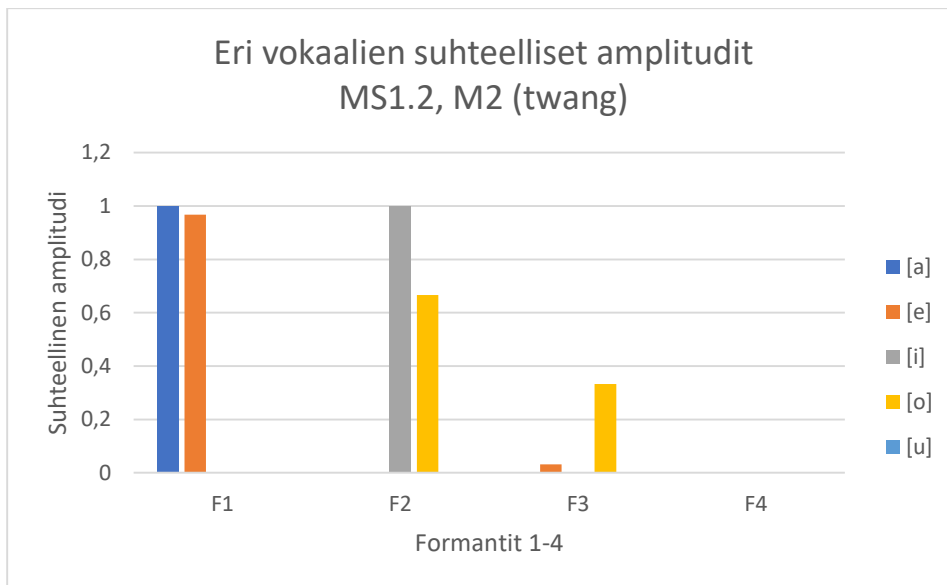
MS1.2:



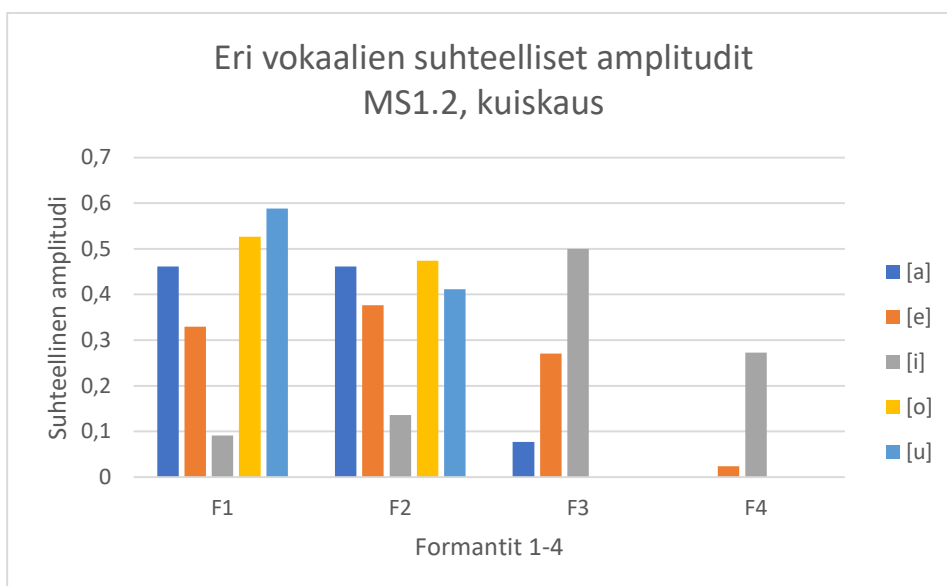
Kuva 49: Eri vokaalien suhteelliset amplitudit, mies, maallikko, M1



Kuva 50: Eri vokaalien suhteelliset amplitudit, mies, maallikko, M2 (vuotoinen)



Kuva 4: Eri vokaalien suhteelliset amplitudit, mies, maallikko, M2 (twang)



Kuva 52: Eri vokaalien suhteelliset amplitudit, mies, maallikko, kuiskaus

M2 (vuotoinen) kuvaajista nähtiin keskimäärin vain vähän formanttialueita vokaaleilla, pois lukien kokelaan N1 kuvaajat, joissa tällä mekanismilla syntyi useampia selkeitä formantteja.

Huomataan selvästi, että jotkin äänentuottotavat tuottavat rikkaampia spektrejä kuin toiset, eli ne sisältävät enemmän selkeästi erottuvia formantteja. Eri henkilöiden välisissä formanttien määrissä on eroja samankin mekanismin sisällä. Näyttäisi kuitenkin siltä, että mekanismi M1 sekä kuiskaus tuottavat luotettavimmin rikkaita spektrejä. Kokelaiden N3, MS3, N2, MS1.1. M1-spektreistä nähtiin lähes jokaisella vokaalilla selkeästi 4 eri formanttia. Muilla kokelailla formantteja oli vähemmän, tai ne olivat huomattavan heikkoja. M2 (vuotoinen) mekanismilla tuotettujen vokaalien spektrit olivat hieman köyhempiä formanttisisällöltään. Poikkeuksiakin oli, kuten kokelas N1, jolla M2 (vuotoinen) mekanismilla tuotetut äänet olivat suhteellisen rikkaita ja monen vokaalin formantit erottuivat hyvin. Tällä kokelaalla kuitenkin oli vaikeuksia koetilanteessa tietää, mitä mekanismeista hän kulloinkin käytti, eikä kokeen järjestäjänsä ollut hänen äänensä tapauksessa helppo havaita aina mitä mekanismeista kulloinkin käytettiin, sillä hänen tapauksessaan eri mekanismit muistuttivat toisiaan paljon. Yllä olevat tulokset eivät siis ole hänen osaltaan varmoja. Huomioitavaa on myös se, että toinen miehistä ei onnistunut ollenkaan tuottamaan twangia, joten hänen osaltaan ei siis ole dataa siitä.

M2 (twang) kuvaajat muistuttivat M2 (vuotoinen) kuvaajia monella kokelaalla. Huomattavaa on, että twangia käytettäessä esiintyi enemmän voimakasintensiteettisiä formantteja korkeilla taajuuksilla, kuin M2 (vuotoinen) kuvaajissa. Verrattuna M1 kuvaajiin molemmat M2 kuvaajat olivat kuitenkin sisällöltään köyhempiä.

Kuiskaus-kuvaajat olivat jokaisella kokelaalla selkeitä ja niistä nähtiin hyvin eri vokaalien formantit. Kuiskatessa syntyi kuitenkin paljon ylimääräistä ilmapirtta, joka aiheutti kohinaa dataan matalille taajuuksille. Tämä otettiin tulkinnessa huomioon ja tällaiset alle 200 Hz olevat taajuudet jätettiin huomiotta.

5.4 Huomioita kokeista

Huomattiin, että kokeen aikana ilmeni joitakin ennakoimattomia tekijöitä, joilla on vaikutusta tämän kaltaisen työn viemiseen luokkahuonetiloihin. Ensinnäkin huomattiin, että jopa saman sukupuolen sisällä äänialat vaihtelivat suuresti, enemmän, kuin oli kuviteltu. Lisäksi eräs laulunopiskelija totesi, että hänelle valitut sävelkorkeudet olivat hänelle liian korkeita, vaikka sävelkorkeuksien valinnassa oli konsultoitu laulunopettajia. Sama ongelma tuli esille myös miesmaallikoiden tapauksessa. Toinen mies ei myöskään pysynyt valitsemassaan sävelessä eri mittauksen aikana, joten jokainen vokaali hänellä on hieman eri perustaajuudella laulettu. Hän ei myöskään onnistunut saamaan M2 mekanismilla ääntä aikaan kovin hyvin, eikä twangia. Twang oli ongelma parille muullekin tässä kokeessa. Tätä varten

otin myös toisen miesmaallikon tutkittavaksi, jotta saisin enemmän dataa siltä saralta. Ensimmäisen kokelaan (MS1.1) äänidata on osittain kyseenalaista sen laadun vuoksi. Samankaltaisia ongelmia tuli esille myös naismaallikon tapauksessa. Näiden perusteella päätin, että koetta tulisi muuntaa siten että laulettavalla sävelkorkeudella ei olisi merkitystä, kunhan laulava henkilö pysyisi sävelessä mittauksen ajan. Tässä kokeessa sävelkorkeus ei vaikuta tuloksiin, sillä formantit löytyvät sävelkorkeudesta riippumatta samoilla kohdilla samalla henkilöllä. Laulamiseen tottumattomilla oppilailla äänen tarkastelu olisi myös hyvä rajata M1 mekanismilla tuotettuun ääneen. M2 mekanismilla saatiin kuitenkin kokeneilla laulajilla hyvin selkeästi näkyviin formantteja ja vokaalien spektrejä käyttämällä twangia. Tätä voitaisiin siis hyödyntää esimerkiksi musiikkiopistoissa tai konservatorioissa.

6. Johtopäätökset

Työn tuloksista nähtiin, että ihmisen laulamat vokaalit voidaan toistettavasti tutkia käyttämällä LoggerPro mittausohjelmaa ja Vernierin mikrofonia. Vokaalien väliset erot saadaan näkyviin hyvin M1 ja M2 (twang) mekanismeilla. M1 kuvaajissa nähtiin keskimäärin jokaisella vokaalilla 4 formanttia seuraavilla kokelailla: N3, MS3, N2, MS1.1. Muilla kokelailla esiintyi vähemmän tai huomattavasti heikompia formantteja tällä mekanismilla tuotetuissa äänissä. M2 (vuotoinen) kuvaajista nähtiin keskimäärin vain vähän formanttialueita vokaaleilla, pois lukien kokelaan N1 kuvaajat, joissa tällä mekanismilla syntyi useampia selkeitä formantteja. M2 (twang) kuvaajissa nähtiin keskimäärin vähemmän formanttialueita kuin M1 mekanismilla tuotetuissa äänissä. Verrattuna M2 (vuotoinen) -kuvaajiin, esiintyi tässä enemmän voimakkaita formantteja korkeilla taajuuksilla. Kuiskaamalla tuotetuista äänistä nähtiin jokaisella kokelaalla keskimäärin selkeästi eri formanttien suhteet. Hankaluutta kuiskausten tulokinnassa aiheutti oletettavasti kuiskatessa syntyvä ilmavirta, joka osui mikrofoniin ja aiheutti kohinaa dataan.

Huomattiin, että opetustilanteessa käyttökelpoisimmat tavat lausua vokaaleita olivat M1 sekä kuiskaus, sillä molemmissa oli suhteellisen rikkaat ja selkeät spektrit ja jokainen kokelas osasi käyttää näitä äänentuottotapoja. Sen sijaan M2 mekanismilla tuotetut äänet olivat hankalia monelle, vaikkakin twangia käyttämällä saatiin näkyviin välillä selkeitä formantteja.

Jokaisen kokelaan äänenväri oli ainutlaatuinen ja äänidatasta muodostetut kuvaajat tukevat tätä. Huomataan, että erilaiset äänet tuottavat selkeästi erilaisia spektrejä tutkituille vokaaleille riippumatta tarkasteltavasta kurkunpään mekanismista.

Lisähaastetta asian opettamiseen tuo formanttikuvaajien tulkinta, johon opettajan täytyy perehtyä syvemmin, jotta siitä saa opetussisältöä. Havaittiin, että jotkin vokaalit voidaan erottaa spektrinsä perusteella toisistaan helpommin kuin muut, esimerkiksi vokaalin [a] ja [u] spektrien huomattiin olevan hyvin erilaiset toisistaan ja harjaantumattomampikin tulkitsija voi erottaa nämä helposti toisistaan.

Työ on tulosten mukaan toteutettavissa sekä yläasteella, että lukiossa sisältöä ja teoriaa sopivasti muokaten oppilaiden taitotasoa vastaavaksi. Oppilaat, jotka eivät halua tai osaa laulaa, voivat äänittää puheääntä ja kuiskausta ja analysoida niiden spektrejä. Huomattiin myös, että mobiilisovelluksen avulla oppilaat voisivat suorittaa hyvin pintapuolisempaa tarkastelua vokaaleista. Tutkimuksen kaltainen oppilaslähtöinen projekti opettaa oppilaita fysiikan tieteen luonteesta ja siitä, miten tiedettä tehdään. Samalla opitaan mittalaitteiden käyttöä ja tulosten käsittelyä.

7. Opetuskokeilu ja projektityö

Jotta tästä tutkimuksesta voitaisiin hyötyä kouluoloissa, on siitä poimittava oleelliset seikat ja muokattava ne koulufysiikkaan sopiviksi. Tässä esitän yhden mahdollisen rungon ihmisäänen opettamiselle ja kokeellisen työn tuomiseksi luokkaan.

Järkevintä olisi ensin tutustua äänen fysiikkaan perinteisesti perehtymällä värähtelijöihin ja seisovan aaltoliikkeen malleihin. Tämän jälkeen tuodaan esille yläsävelsarja ja selitetään sen muodostuminen. Demonstroidaan ensin LoggerPro:n mikrofoniin avulla, millaisen spektrin signaaligeneraattorin puhdas siniaalto muodostaa. Sen jälkeen voidaan katsoa reaaliaikaisen esimerkkejä, kuten kitaran kielen ja pianon äänen spektriä. Näitä verrataan vaikkapa virvelirummun äänen spektriin ja huomataan, miten ne eroavat osäänesten harmonisuuden osalta. Nähdään, että siniaallolla näkyy vain alin osäänne, perustaajuus, kitaran kielellä näkyy perustaajuus ja sen monikerrat ja virvelin tapauksessa näkyy energian jakautuminen laajalle taajuuskaistalle.

Tämän jälkeen on luontevaa kertoa, kuinka laulettujen äänet muodostavat harmonisen yläsävelsarjan. Laulettaessa kuitenkin syntyneisiin taajuuspiikkeihin vaikuttaa käytetty vokaali, eli ääntöväylän muoto. Puhutaan lyhyesti anatomiasta, kuten kielen sijoittumisesta ja resonanssiontelosta. Tässä on hyvä selittää, miten vokaalit muodostuvat. Uutena asiana tulee se, että kun vokaalia lausuttaessa ääntöelimet asetetaan tiettyyn muotoon, tämä muoto mahdollistaa tiettyjen äänen taajuuksien voimistumisen, joka johtuu ääntöelimien asennon muodostamista resonanssikammioista. Kutsutaan näitä ääntöväylän muotoja formanteiksi tästä eteenpäin. Kerrotaan, että formantit voimistavat tietyille taajuuskaistalle osuvia osäänneksiä, täten saaden aikaan vokaalille ominaisen soinnin. Vokaalit siis erotetaan toisistaan korvalla näiden formanttien takia.

Oppilaita voi halutessaan pyytää miettimään, miten he kuvailisivat vaikkapa vokaaleja [a] ja [i]. [a] usein koetaan avoimena ja [i] pienenä tai suppeana. Nämä erot voidaan nähdä myös tietokoneen avulla äänestä.

Tarkoitus olisi teorian opetuksen jälkeen, että oppilaat suorittaisivat projektityön, jossa he tutkivat laulettujen vokaalien formantteja. Oppilaat voivat ryhmissä tutkia LoggerPro:n avulla eri vokaalien spektrejä. Hyviä vokaaleja olisivat mm. [a], [i] ja [u], sillä niiden pitäisi erottua toisistaan helposti. Oppilaat voisivat tämän jälkeen etsiä kuvaajista formanttialueet ja eri osäänesten voimakkuuserot eri vokaaleissa.

Tarkoitus on tutustuttaa oppilaat mittaamaan ääniä laitteistolla ja oppimaan, miten ihmisen ääni toimii. Oppilaat oppivat tässä myös edistynyttä mittausohjelman käyttöä, sillä FFT-diagrammien tekeminen on välttämätöntä tässä työssä. Vuonna 2021

käyttöön otettavassa lukion opetussuunnitelmassa mainitaan erikseen äänen taajuusanalyysi opetettavissa sisällöissä (LOPS 2019, 255).

Opettaja voi seurata oppilaiden työskentelyä ja tarkistaa, että kaikki saavat oikean näköisiä tuloksia aikaan. On jo hyvä, jos saadaan aikaiseksi kuvaajia, jotka ovat eri vokaaleille eri näköisiä. Osalle oppilaista riittää jo tämä tieto, esimerkiksi yläasteikäisille.

On oletettavaa, että kaikki oppilaat eivät tahdo laulaa, joten voidaan tarkastella tällaisilta oppilailta myös pitkiä vokaaleja ns. puheäänien sävelkorkeudella. Näistäkin näkee jo halutut asiat. Kaikissa kouluissa ei myöskään ole oppilaita varten tietokoneita tai mittalaitteita, joten tätä varten Spectroid sovellus, tai joku muu vastaava hyväksi todettu ja ilmainen sovellus tulee tarpeeseen. Puhelinsovellus tuo myös mahdollisuuden ulkoistaa tämä projekti osittain kotiin tai muuten vapaa-ajalle suoritettavaksi.

Oppilaat voivat mittauksen tehtyään koota tärkeimmät asiat äänen fysiikasta vaikkapa Word dokumenttiin ja liittää siihen mittaamansa vokaalien spektrit. Näitä spektrejä pitäisi pystyä opetetuilla tiedoilla hieman avaamaan samaan tiedostoon. Toinen mahdollisuus on tehdä tietokoneella posterit, esim. PowerPointin avulla. Nämä palautetaan opettajalle, joka arvostelee ne.

Laulaminen on siitä hyvä, että sen avulla tehtyjen kuvaajien lukemiseen voidaan käyttää apuna nuottien nimiä. Tämä etenkin toimisi musiikkipainotteisissa kouluissa. Oppilas voi tällöin laulaa pianolla soitetun sävelen. Voidaan sen jälkeen katsoa erikseen oppilaan ja pianon äänten spektrit. Tässä tapauksessa nähtäisiin myös yläsävelten samankaltaisuus, sillä ne toistuvat samoin välein molemmissa. Ainoa ero olisi niiden voimakkuuksissa ja ihmisäänien formanteissa.

8. Viitteet

Cambridge university press, Muokattu kuva kurkunpäästä, osoitteesta:

<https://www.cambridge.org/core/books/silverbergs-principles-and-practice-of-surgical-pathology-and-cytopathology/larynx-and-trachea/2196EA3FAC99F6C3822E0A2661C7E838> Luettu 13.4.2020 (vaatii

käyttöoikeuden)

Castellengo M., Chuberre B., Henrich N., Is Voix Mixte, the Vocal Technique Used to Smoothe the Transition across the two Main Laryngeal Mechanisms, an Independent Mechanism? (2004)

Chen, C., J. Elements of human voice, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. (2016)

Clough, M., P., Learners' Responses to the Demands of Conceptual Change: Considerations for Effective Nature of Science Instruction, Science Education, 15:463–494, Springer (2006)

Duit, R., Gropengrießer, H., Kattmann, U., Komorek, M., Parchmann, I., The model of educational reconstruction – a framework for improving teaching and learning science, Jorde, D., Dillon, J., (Editors), Science Education Research and Practice in Europe: Retrospective and Prospective, 13–37, Sense Publishers (2012)

Duit, R., Schecker, H., Höttecke, D., Niedderer, H., Teaching physics, Handbook of research in science education ch. 22, Routledge, (2014)

Fletcher, H., D., Speech and Hearing, D. Van Nostrand Company, Inc., (1929)

Foneemi: iso suomen kielioppi verkkoversio §1, 2008, Kielen äännejärjestelmästä: foneemit, osoitteesta: <http://scripta.kotus.fi/visk/sisallys.php?p=1> Luettu 13.4.2020

Glottaaliklusiili: Iso suomen kielioppi, verkkoversio, § 36, 2008, osoitteesta: <http://scripta.kotus.fi/visk/sisallys.php?p=36> Luettu 13.4.2020

Henrich, N., Roubeau, B., Castellengo, M., On the use of electroglottography for characterization of the laryngeal mechanisms (2003)

Henrich, N., d'Alessandro, C., Doval, B., Castellengo, M., On the use of the derivative of electroglottographic signals for characterization of nonpathological phonation, The Journal of the Acoustical Society of America (2004)

Hofstein, A., Kind, P., M., Chapter 15 Learning In and From Science Laboratories, Barry J. Fraser, B., J., Tobin, K., McRobbie, C., J., (Editors), Second International Handbook of Science Education Part One, Springer Science+Business Media B.V. (2012)

Hoffman, G. L., Jouny, I., Using music to teach physics, American Journal of Physics, Volume 64, Issue 10, pp. 1304-1307 (1996).

Honda, K., Evolution of vowel production studies, Acoustical Science and Technology 23, 4 (2002)

Hämäläinen, Ari, Opettajien laboriokurssi I 1.7 Värähdysliike, Fysiikan laitos, (2015)

Koponen, I., Fysiikan käsitteet ja käsiterakenteet: Didaktisen fysiikan näkökulma. Helsinki, (2014)

Laukenmann, M., Bleicher, M., Fuß, S., Gläser-Zikuda, M., Mayring, P., von Rhöneck, C., An investigation of the influence of emotional factors on learning in physics instruction, INT. J. SCI. EDUC., VOL. 25, NO. 4, 489–507, (2003)

Lukion opetussuunnitelman perusteet, Opetushallitus, (2015)

Lukion opetussuunnitelman perusteet, Opetushallitus, (2019)

Lähiäänivaikutus osoitteesta <https://www.neumann.com/homestudio/en/what-is-the-proximity-effect> Luettu 13.4.2020

Holmberg, E., B., Hillman, R., E., Perkell, J., S., Glottal airflow and transglottal air pressure measurements for male and female speakers in soft, normal, and loud voice, The Journal of the Acoustical Society of America 84, 511 (1988)

Mizener, C., P., Attitudes of Children toward Singing and Choir Participation and Assessed Singing Skill, University of Texas-Pan American, Edinburg (1993)

Mulhall, P., Gunstone, R., Views about Physics held by Physics Teachers with Differing Approaches to Teaching Physics, (2007)

Perusopetuksen opetussuunnitelman perusteet, Opetushallitus, (2014)

Peterson, G., E., Barney, H., L., Control methods used in a study of the vowels, The journal of the acoustical society of America vol. 24 number 2 (1952)

Piano keski-C: <https://www.zytrax.com/tech/audio/digital-sound.html> Luettu 13.4.2020

Pierce, J., R., The Science Of Musical Sound Revised Edition, Scientific American Books, USA, (1992)

Pintrich, P., R., Marx, R., W., Boyle, R., A., Beyond Cold Conceptual Change: The Role of Motivational Beliefs and Classroom Contextual Factors in the Process of Conceptual Change, Review of Educational Research, Vol. 63, No. 2. pp. 167-199. (1993)

Pratt, R., L., and Doak, P., E., A subjective rating scale for timbre, Journal of Sound and Vibration, (1976)

Rauste-Von Wright, M., Von Wright, J., Soini, T., Oppiminen ja koulutus, WSOY, (2003)

Rossing, T., D. Science of Sound (second edition). Addison-Wesley Publishing Company, (1990)

Roubeau, B., Henrich, N., Castellengo, M., Laryngeal Vibratory Mechanisms: The Notion of Vocal Register Revisited, Journal of voice: official journal of the Voice Foundation (2008)

Saldanha, E., L., and Corso, J., F., Timbre Cues and the Identification of Musical Instruments, The Journal of the Acoustical Society of America 36, 2021, Acoustical Society Of America, (1964)

Sataloff, R., T., M.D., D.M.A., Vocal Health, osoitteesta <https://static1.squarespace.com/static/5952719a099c0135ab53f261/t/5a3b1da44192020d234ad450/1513823652922/Vocal+Health+%28PAO+Website+Patient+Info%29+%282%29.pdf> Luettu 13.4.2020

Schneider, A., Frieler, K., Perception of Harmonic and Inharmonic Sounds: Results from Ear Models, Institute for Musicology, University of Hamburg, Germany, (2008)

Setälä, J., Äänenväri ja sen opettaminen, (2018)

SHURE model BG 4.1 UNIDIRECTIONAL CONDENSER MICROPHONE user guide, Shure Brothers Incorporated, (1998)

Sibelius Akatemia, Akustiikan Perusteet – Verhokäyrä, (2009), osoitteesta: <http://www2.siba.fi/akustiikka/index.php?id=16&la=fi> Luettu 13.4.2020

Sjøberg, S., Schreiner, C., The ROSE project: An overview and key findings, University of Oslo, (2010)

Stadler, H., Duit, R., Benke, G., Do boys and girls understand physics differently?, Physics Education, Volume 35, Number 6, (2000)

Sundberg, J., Articulatory interpretation of the "singing formant", The Journal of the Acoustical Society of America 55, 838, (1974)

Sundberg, J., Thalén, M., What is "Twang"?, Journal of Voice Volume 24, Issue 6, November 2010, Pages 654-660, (2010)

Sundberg, J., The Singing Voice, The Oxford Handbook of Voice Perception, Oxford Library of Psychology Series, Frühholz, S., Belin, P. (Editors), Oxford University Press, (2019)

Sävelten taajuudet (tasavireinen järjestelmä) osoitteesta: <https://pages.mtu.edu/~suits/notefreqs.html> Luettu 13.4.2020

Taber, K., S., Progressing Science Education, Springer Science+Business Media, LLC, (2009)

Titze, Ingo, R. Principles of Voice Production. Prentice –Hall, Inc. (1994)

Tynjälä, P., Oppiminen tiedon rakentamisena, Tekijä ja Kirjayhtymä Oy, (1999)

Verkkokielioppi: © Finn Lectura / Erkki Savolainen 2001. Luettu 13.4.2020
osoitteesta: <https://fl.finnlectura.fi/verkkosuomi/Fonologia/sivu162.htm>

Wandersee, J., H., Mintzes, J., J., Novak, J., D., Research on alternative conceptions in science, Handbook of research on science teaching and learning ch. 5, Gabel, D., I., (Editor), Simon & Schuster Macmillan, (1994)

Willis, R., M.A., On the Vowel Sounds, and on Reed Organ-Pipes, (1829)

Winckell, Fritz, Music, Sound and Sensation, Dover, NY, (1967)

Yanagisawa, E., Estill, J., Kmucha, S., T., Leder, S., B., The Contribution of Aryepiglottic Constriction to "Ringing" Voice Quality - A Videolaryngoscopic Study with Acoustic Analysis, Journal of Voice Vol. 3, No. 4, pp. 342-350, Raven Press, Ltd., New York, (1989)

Äänielinten suomennokset ovat lähteestä

<https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10224/3513/006.htm>

(Huomautus: Spektrikuvaajien tulkinnan apuna on käytetty mm. tämän verkkosivun materiaalia (Luettu 13.4.2020):

<https://person2.sol.lu.se/SidneyWood/praaate/whatform.html>)